



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**Mejora de Uniones de Chapa de Aluminio con Adhesivo
Mediante Tratamiento Superficial por Proyección de
Partículas Abrasivas**

Grado en ingeniería Mecánica

Autor: Lucas Valero Porras
Tutor: José Andrés López Fernández
Cotutor: Fermín Bañón García

MÁLAGA, Junio de 2025



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Resumen

En el campo de las uniones adhesivas, el tratamiento superficial de los sustratos metálicos es un factor crítico que condiciona la resistencia final de la unión. En el caso del aluminio, el tratamiento por granallado mediante partículas de vidrio o corindón se emplea para modificar las características superficiales, aumentando su rugosidad y promoviendo una mejor adhesión mecánica del adhesivo. Este proceso genera una topografía superficial específica que, además de favorecer el anclaje físico del adhesivo, puede alterar la energía superficial del material y, por tanto, su humectabilidad.

Particularmente, en las uniones adhesivas de aluminio, el tipo de abrasivo utilizado en el granallado influye de forma directa en el comportamiento mecánico de la unión. Mientras que el uso de partículas de vidrio produce una modificación más suave y homogénea de la superficie, el corindón genera una textura más agresiva que puede inducir concentraciones de tensiones locales en la interfaz.

Por tanto, se puede decir que el tratamiento de superficie previo al ensamblaje adhesivo es crítico en la fabricación industrial y en sectores como la aeronáutica, donde la fiabilidad estructural es esencial. Una preparación inadecuada o una elección incorrecta del abrasivo puede comprometer la integridad de la unión y su durabilidad en servicio. Por este motivo, existe un gran interés en optimizar los procesos de tratamiento superficial para garantizar un rendimiento adecuado de las uniones adhesivas.

El objetivo de este proyecto es estudiar la influencia del granallado con partículas de vidrio y corindón en la resistencia de uniones adhesivas de aluminio. En estos ensayos se han variado parámetros como el tipo de abrasivo y las condiciones del proceso para evaluar su efecto sobre las propiedades mecánicas de la unión. En consecuencia, el objetivo principal de este proyecto es desarrollar un procedimiento fiable de preparación superficial que maximice la resistencia y la durabilidad de las uniones adhesivas en aluminio.

Para ello, se han realizado ensayos de tracción en muestras tratadas bajo distintas condiciones de granallado. Una vez obtenidos los datos, se han propuesto dos metodologías de análisis: la evaluación de la rugosidad superficial mediante microscopía confocal y la mojabilidad mediante ensayo de gota sésil. Posteriormente, los resultados obtenidos se han correlacionado con los modos de fallo observados y con la resistencia máxima alcanzada en los ensayos mecánicos, siguiendo las metodologías propuestas en la literatura reciente.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Abstract

In the field of adhesive joints, the surface treatment of metallic substrates is a critical factor that determines the final strength of the joint. In the case of aluminum, shot peening treatment using glass or corundum particles is employed to modify the surface characteristics, increasing its roughness and promoting better mechanical adhesion of the adhesive. This process generates a specific surface topography that, in addition to favoring the physical anchoring of the adhesive, can alter the surface energy of the material and, therefore, its wettability.

Particularly, in aluminum adhesive joints, the type of abrasive used in shot peening directly influences the mechanical behavior of the joint. While the use of glass particles produces smoother and more homogeneous surface modification, corundum generates a more aggressive texture that can induce local stress concentrations at the interface.

Therefore, it can be said that surface treatment prior to adhesive assembly is critical in industrial manufacturing and in sectors such as aeronautics, where structural reliability is essential. Inadequate preparation or an incorrect choice of abrasive can compromise the integrity of the joint and its durability in service. For this reason, there is great interest in optimizing surface treatment processes to ensure adequate performance of adhesive joints.

The objective of this project is to study the influence of shot peening with glass and corundum particles on the strength of aluminum adhesive joints. In these tests, parameters such as the type of abrasive and process conditions have been varied to evaluate their effect on the mechanical properties of the joint. Consequently, the main objective of this project is to develop a reliable surface preparation procedure that maximizes the strength and durability of aluminum adhesive joints.

To this end, tensile tests have been carried out on samples treated under different shot peening conditions. Once the data were obtained, two analysis methodologies were proposed: surface roughness evaluation using confocal microscopy and wettability evaluation using the sessile drop test. Subsequently, the results obtained were correlated with the observed failure modes and the maximum strength achieved in the mechanical tests, following the methodologies proposed in recent literature.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Índice

Resumen	3
Abstract	5
Índice de figuras	10
Índice de tablas	14
Capítulo 1	
Introducción	16
1.1. Motivación	16
1.2. Objetivos	17
1.3 Estructura del trabajo	17
Capítulo 2	
Estado del Arte	18
2.1. Uniones en la industria	18
2.2. Tipos de uniones	19
2.2.1. Uniones Soldadas	19
2.2.2. Uniones mecánicas	19
2.2.3. Interferencia y pretensado ajustado	21
2.2.4. Uniones adhesivas	22
2.3. Introducción a las Uniones Adhesivas	23
2.3.1. Tipo de uniones adhesivas	24
2.3.2. Caracterización de uniones adhesivas	25
2.3.3. Forma en la que se produce la fractura	29
2.4. Características de los adhesivos	31
2.4.1. Composición de adhesivos	31
2.4.2. Metodologías de aplicación de adhesivos	33
2.4.3. Clasificación de adhesivos	34
2.5. Calidad superficial	36
2.5.1. Energía libre superficial y mojabilidad	37
2.5.2. Rugosidad	38
2.5.3. Activación superficial mediante granallado	39
2.5.4. Evaluación de la calidad superficial	40
Capítulo 3	
Metodología Experimental	42
3.1. Materiales	42
3.1.1. Sustrato	42
3.1.2. Adhesivo	46
3.1.3. Granalla	48



3.2. Fabricación de las probetas	51
3.2.1. Corte.....	52
3.2.2. Tratamiento superficial	52
3.2.3. Pegado	57
3.3. Caracterización superficial de las probetas.....	64
3.3.1. Rugosidad	64
3.3.2. Mojabilidad	67
3.4. Caracterización mecánica de las uniones.....	71
3.4.1 Ensayo de tracción	71
Capítulo 4	
Resultados	77
4.1. Propiedades de las superficies	77
4.1.1. Inspección visual tras la texturización	77
4.1.2. Caracterización de las superficies usando un microscopio confocal.....	82
4.1.3. Energía libre y mojabilidad	88
4.2. Caracterización mecánica de las uniones.....	90
4.2.1. Inspección visual tras el ensayo de tracción.....	91
4.2.2. Resultados de los ensayos de tracción.....	94
Capítulo 5	
Conclusiones	102
5.1. Conclusiones Generales.....	102
5.2. Conclusiones Específicas	103
5.3 Conclusión Final.....	103
5.4. Líneas futuras	104
Capítulo 6	
Bibliografía	105



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Índice de figuras

Figura 1. Resultado final de la unión de dos sustratos realizado mediante soldadura: (a) soldadura junta de borde en unión de borde, (b) soldadura junta de borde en una unión a tope con brida y (c) soldadura junta de borde en una unión en esquina con brida (Tipos de Uniones Soldadas: Guía Completa Sobre Soldaduras y Usos, n.d.)	19
Figura 2. Esquema de la unión mediante remache (AULA DE MECANICA: AMOVIBLES, n.d.).....	20
Figura 3. Esquema de las partes que intervienen en la unión atornillada (Viñals Burgo, 2008).	21
Figura 4. (a) Esquema de interferencia y (b) Esquema pretensado ajustado (Simmons et al., 2012)...	22
Figura 5. Esquema típico de una unión por adhesivo (Sánchez Matrán, 2010).....	22
Figura 6. Esquema de la disposición de los diferentes elementos que intervienen en una unión mediante adhesivos (elaboración propia).	23
Figura 7. Tipos de uniones adhesivas según la norma: (a) unión por solapamiento, (b) unión por doble solapamiento, (c) unión a tope y (d) unión biselada (UNE-EN 923, 2016).	25
Figura 8. Diferentes esfuerzos en ensayos mecánicos según la norma: (a) esfuerzo por cizallamiento por tracción, (b) esfuerzo por pelado, (c) esfuerzo por tracción, (d) esfuerzo por separación y (e) esfuerzo por cizallamiento por torsión. (UNE-EN 923, 2016).....	27
Figura 9. Esquema de ensayo a tracción en una unión a tope (elaboración propia).	28
Figura 10. (a) Unión realizadas por pelado a 90° (UNE-EN 28510-1, 2014). (b) Unión realizadas por pelado a 180° (UNE-EN_ISO_8510-2, 2011). (c) Unión realizadas por pelado en T (UNE-EN_ISO_11339, 2022).	28
Figura 11. Esquema de ensayo a tracción por uniones solapadas (elaboración propia).	29
Figura 12. Representación de los casos posibles según ángulo de la gota (Piña Piña et al., 2021).	37
Figura 13. Representación de la rugosidad superficial de un material (UNE-EN_ISO_21920-2, 2023).	38
Figura 14. Adhesivo MA Profesional KTM 20-A43 (MA Professional Klej Epoksydowy Do Metalu 5 Minut - Strzykawka, n.d.)	47
Figura 15. Corindón O80 (Aguila Noroeste S.L, n.d.).	49
Figura 16. Esferas de Vidrio 1216 CP-00 (Bola de Vidrio (Microesferas de Vidrio) Para Procesos de Chorreado-AYMSA, n.d.).....	50
Figura 17. Vista en planta del esquema de medidas reguladas que deben tener las probetas según la norma (UNE-EN 1465, 2009).	52
Figura 18. Esquema de medidas de un sustrato cortado.	52
Figura 19. Esquema de medidas del extremo a tratar y zona protegida por cinta de carroceros TESA 4317.	53
Figura 20. (a) Imagen general de la granalladora. (b) Imagen del perfil derecho de la granalladora. (c) Imagen del perfil izquierdo de la granalladora. (d) Panel eléctrico de la granalladora. (e) Imagen de la parte trasera de la granalladora. (f) Regulador de presión con manómetro. (g) Interior de la granalladora.	54

Figura 21. (a) Hueco para introducir probetas con puerta y pestillo de seguridad ubicado en la parte trasera. (b) Panel eléctrico.....	56
Figura 22. (a) Elemento del regulador de presión de la máquina de granallado. (b) Visión interior de la granalladora desde el exterior por el vidrio protector.	57
Figura 23. Producto utilizado para la limpieza de las superficies previas al pegado: Fumicida Bionet® Plus.	58
Figura 24. Vista del perfil de los suplementos añadidos.	58
Figura 25. Útil utilizado para mantener la reproducibilidad en el ensayo.	59
Figura 26. Útil utilizado para la altura y las medidas de la zona de pegado.....	59
Figura 27. (a) Dispositivo de aplicación del adhesivo bicomponente. (b) Ejemplo de cantidad de mezcla de adhesivo empleada para el pegado de cada probeta.	60
Figura 28. Espátula y mezcla realizada para proceder con el pegado.....	60
Figura 29. Adhesivo aplicado en la superficie marcada para pegar.....	61
Figura 30. Fijación del primer sustrato en el útil de alineamiento.....	62
Figura 31. Probetas en posición para ser pegadas, útil de pegado y pesa de 1 kg para mantener reproducibilidad.....	62
Figura 32. Probetas en posición para ser pegadas y pesa de 1 kg para mantener reproducibilidad tras 5 min.	63
Figura 33. Probetas pegadas.....	63
Figura 34. Probeta lista para ensayo a tracción.	64
Figura 35. Equipo 3D Infinite Focus SL de la empresa Alicona®.	65
Figura 36. Representación 3D usando el equipo Alicona® de una superficie de aluminio tratada mediante granallado de vidrio.	66
Figura 37. Representación gráfica del perfil de la superficie tratada con vidrio a lo largo de 1,8 milímetros mediante aparato Alicona®.	66
Figura 38. Representación topográfica en μm usando el equipo Alicona® de una superficie de aluminio tratada mediante granallado de corindón.	67
Figura 39. Representación gráfica del perfil de la superficie tratada con corindón a lo largo de 3000 micrómetros mediante aparato Alicona®.....	67
Figura 40. Montaje de los útiles necesarios para el ensayo.....	68
Figura 41. Mesa de calibración automática Revopoint.	68
Figura 42. Micropipeta Pipetman Classic usada para la aplicación de la gota en el ensayo sésil.	69
Figura 43. Deposición de gota con pipeta sobre sustrato.	70
Figura 44. Representación del ángulo de gota sobre el sustrato.....	70
Figura 45. Elementos de la mordaza inferior tipo cuña de la máquina de tracción.....	72
Figura 46. Mordazas tras proceso de alineación.	72
Figura 47. Probeta y elementos de la máquina de tracción durante el proceso de ensayo.....	74
Figura 48. Probetas tras el pegado.....	74
Figura 49. Probetas tras el ensayo de tracción.....	75



Figura 50. Curva fuerza-desplazamiento obtenida durante el ensayo de tracción. Se indica el valor de la fuerza máxima (F_{max}).....	76
Figura 51. Superficie de las probetas tras el tratamiento de granallado usando esferas de vidrio a presión 5 bar.	78
Figura 52. Superficie del sustrato mediante equipo Alicona tras tratamiento con vidrio a 5 bar.	78
Figura 53. Superficie de las probetas tras el tratamiento de granallado usando corindón a presión 5 bar.	79
Figura 54. Superficie del sustrato mediante aparato Alicona tras tratamiento con corindón a presión 5 bar.	79
Figura 55. Comparación de R_a y S_a en probetas sin tratamiento.	83
Figura 56. Comparación de R_a y S_a en probetas tratadas con vidrio.	84
Figura 57. Comparación de S_z y S_k en probetas tratadas con vidrio.	84
Figura 58. Comparación de R_a y S_a en probetas tratadas con corindón.	85
Figura 59. Comparación de S_z y S_k en probetas tratadas con corindón.	85
Figura 60. Comparación con parámetro R_a	86
Figura 61. Comparación con parámetro S_a	87
Figura 62. Comparación con parámetro S_k	88
Figura 63. Ejemplo de resultado del ensayo de gota sésil.	88
Figura 64. Representación gráfica de los resultados.	89
Figura 65. (a) Ejemplo de resultado en probeta sin granallar. (b) Ejemplo de resultado en probeta tratadas con vidrio a 5 bar. (c) Ejemplo de resultado en probeta tratadas con corindón a 5 bar.	90
Figura 66. (a) Ejemplo de resultados Fallo cohesivo del adhesivo AF en donde el adhesivo está situado en una sola probeta. (b) Ejemplo de resultados Fallo cohesivo del adhesivo AF en donde el adhesivo está situado en ambas probetas.	92
Figura 67. Ejemplo de resultados tras ensayo de tracción en probetas sin granallar.	95
Figura 68. Resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con vidrio.	96
Figura 69. Ejemplo de resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con vidrio.	97
Figura 70. Resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con corindón.	97
Figura 71. Ejemplo de resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con corindón.	98
Figura 72. Representación de los valores comparados tras ensayo de tracción en probetas tratadas y sin tratar.	99
Figura 73. Representación de los valores medios comparados tras ensayo de tracción en probetas tratadas y sin tratar.	100



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Índice de tablas

Tabla 1. Modelos de fallo (UNE-EN_ISO_10365, 2022).	30
Tabla 2. Clasificación de las Aleaciones de Aluminio (Salguero Gómez & Salguero Gómez, 2013).	43
Tabla 3. Composición de la aleación UNS A92024-T3 (M. Geraldine Bogotá, n.d.; Salguero Gómez & Salguero Gómez, 2013; U. 38314, n.d.).	45
Tabla 4. Características del adhesivo empleado (MA Professional Klej Epoksydowy Do Metalu 5 Minut - Strzykawka, n.d.).....	47
Tabla 5. Características de las partículas de corindón empleadas (CORINDON MARRON o8o (25Kg) CORINDON MARRON o8o (SACOS 25Kg), n.d.).....	49
Tabla 6. Características de las partículas de vidrio empleadas (Bola de Vidrio (Microesferas de Vidrio) Para Procesos de Chorreado-AYMSA, n.d.).	51
Tabla 7. Parámetros de granallado.	55
Tabla 8. Comparación visual tras tratamiento.	80
Tabla 9. Comparación visual mediante equipo Alicona tras tratamiento.	81
Tabla 10. Resultados numéricos obtenidos por equipo Alicona.	82
Tabla 11. Resultados del ensayo de gota sésil.	89
Tabla 12. Resultados tras ensayo de tracción en probetas sin granallar.....	92
Tabla 13. Resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas.	93
Tabla 14. Resultados numéricos tras ensayo de tracción.	94



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Capítulo 1

Introducción

La mejora de uniones de chapa de aluminio con adhesivo es un aspecto clave en sectores como la automoción y la aeronáutica, donde se busca una combinación óptima entre resistencia mecánica y reducción de peso. Sin embargo, lograr una adhesión efectiva entre el adhesivo y el sustrato de aluminio ha representado históricamente un desafío técnico debido a la presencia de capas superficiales de óxido y contaminantes.

Por ello, existe un interés creciente en estudiar tratamientos superficiales que mejoren la energía superficial del aluminio y favorezcan el anclaje mecánico del adhesivo. Uno de los métodos que ha cobrado relevancia en los últimos años es el tratamiento mediante proyección de partículas abrasivas, también conocido como granallado o arenado. Este tratamiento no solo incrementa la rugosidad superficial, sino que también elimina óxidos y contaminantes, promoviendo una superficie más receptiva al adhesivo.

1.1. Motivación

El uso de uniones es una práctica común en múltiples sectores industriales, como la automoción y la aeronáutica, donde se requiere ensamblar componentes metálicos de manera eficiente. Concretamente, las uniones adhesivas han ganado protagonismo debido a sus numerosas ventajas frente a métodos tradicionales, como la distribución uniforme de tensiones, la reducción de peso y la posibilidad de unir materiales disímiles sin alterar sus propiedades mecánicas.

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, la eficacia de las uniones adhesivas puede verse comprometida por una preparación inadecuada de las superficies a unir, especialmente en el caso del aluminio, cuyas características superficiales pueden dificultar la adhesión. Es por tanto importante para la industria optimizar estas uniones mediante métodos que mejoren la interacción entre el adhesivo y el sustrato.

El interés en este campo de estudio ha dado lugar a un enfoque innovador basado en la modificación de superficies de chapas de aluminio mediante la proyección de partículas abrasivas. Este tratamiento superficial tiene como objetivo incrementar la rugosidad, eliminar contaminantes y óxidos, y, en consecuencia, mejorar la energía superficial del material, favoreciendo así su capacidad de adhesión.



Se han llevado a cabo ensayos comparativos con diferentes parámetros del tratamiento abrasivo y se han evaluado el efecto de dichas variables en la resistencia mecánica de las uniones adhesivas resultantes, con el objetivo de identificar las condiciones óptimas para aplicaciones industriales reales.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la mejora de las uniones de chapas metálicas mediante el uso de adhesivos, empleando técnicas como son el granallado con partículas a alta velocidad. Para lograr este objetivo, se han seguido unos enfoques metodológicos que se detallan a continuación:

En primer lugar, se han realizado unas investigaciones bibliográficas para comprender en detalle el estado actual del granallado por partículas a alta velocidad. Esto nos han permitido establecer una base para la comparación de las técnicas de granallado y sus efectos en las propiedades de las uniones adhesivas.

En segundo lugar, se han llevado a cabo una revisión de los diferentes tipos de adhesivos disponibles en el mercado. Se han analizado su composición, propiedades y aplicaciones para determinar cuáles son los más adecuados para las necesidades del presente trabajo.

Una vez recopilada esta información, se dio inicio a la fase experimental, en la que se caracterizó tanto la superficie antes y después del granallado como las propiedades mecánicas de las uniones, evaluadas mediante ensayos de tracción.

Al alcanzar estos objetivos, este trabajo de fin de grado contribuye a la comprensión y aplicación de técnicas de mejora de uniones de chapas metálicas mediante el uso de adhesivos. Este avance espera tener un impacto positivo en diversas industrias, como la automotriz y la aeroespacial, al mejorar la eficiencia y durabilidad de las estructuras metálicas utilizadas en dichos sectores.

1.3 Estructura del trabajo

Este trabajo se divide en cinco capítulos, incluyendo la presente introducción como el capítulo 1. En primer lugar, el Capítulo 2 Estado del arte ofrece una revisión exhaustiva de la literatura sobre las uniones en la industria, centrándonos en las uniones adhesivas. Posteriormente, el Capítulo 3 Procedimientos experimentales y metodologías se describen detalladamente los procedimientos experimentales seguidos y las metodologías empleadas en el estudio. Además, en el Capítulo 4 Resultados se presenta los resultados obtenidos de los experimentos, tanto a nivel superficial como en la caracterización mecánica de las uniones adhesivas. Se exponen los hallazgos clave y se analizan los datos obtenidos en función de las pruebas realizadas. Para finalizar, Capítulo 5 Conclusiones y futuras líneas de trabajo se resumen las principales conclusiones derivadas de la investigación. Además, se proponen futuras líneas de investigación que podrían continuar explorando las uniones adhesivas.



Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Uniones en la industria

Las uniones en la industria desempeñan un papel crucial en la fabricación de estructuras y productos que cumplen con los estándares de rendimiento, durabilidad y eficiencia exigidos. Estas uniones se conocen desde tiempos pasados, donde las civilizaciones empleaban métodos rudimentarios como el atado, el pegado con resinas naturales y la soldadura por calor para unir materiales como madera, piedra y metales, hasta la actualidad donde la evolución continúa con diferentes demandas introduciendo tecnologías avanzadas como la fabricación aditiva o la unión adhesiva.

Con el avance de la tecnología y la creciente demanda de materiales, se han intensificado el interés en la combinación de materiales, ya sean distintos o iguales en elementos estructurales, para mejorar su rendimiento funcional. Esta práctica, conocida como diseño de estructuras híbridas, está ganando cada vez más popularidad debido a los beneficios significativos que ofrece en términos de resistencia, rigidez, peso, durabilidad y eficiencia.

Una de las razones clave detrás de esta tendencia es la búsqueda constante de productos y estructuras que sean más ligeros, resistentes y eficientes. La combinación de diferentes materiales permite a los ingenieros aprovechar las fortalezas individuales de cada material para optimizar el rendimiento del elemento estructural en su conjunto, utilizando, por ejemplo, materiales compuestos que combinan una matriz polimérica con refuerzos como fibra de carbono, vidrio o aramida, ofreciendo una combinación única de resistencia, rigidez y ligereza con materiales metálicos, como el acero, el aluminio y el titanio, que han sido fundamentales en la industria durante siglos debido a su resistencia, durabilidad y capacidad de formado, mejorando la capacidad de absorción de energía y la durabilidad.

Además, la combinación de materiales permite a los diseñadores y fabricantes abordar desafíos específicos de diseño y requisitos de rendimiento de manera más efectiva. Por ejemplo, en aplicaciones aeroespaciales y automotrices donde se busca la optimización de operaciones de ensamblaje, cuya función es reducir tiempos de inspección en uniones entre elementos o entre el peso de la estructura final con una alta resistencia específica y una excelente resistencia a la fatiga, utilizando FML (Fiber Metal Laminate) (Dunn, 2003), un tipo específico de material compuesto que combina láminas delgadas de metal con láminas de refuerzo de fibra. Asimismo, en aplicaciones donde se requiere un control preciso sobre las propiedades mecánicas y térmicas, los stacks (Wahab et al., 2012), que consisten en la superposición ordenada de láminas delgadas de diferentes materiales, permiten la creación de estructuras compuestas con propiedades específicas.

2.2. Tipos de uniones

A continuación, se expondrán las uniones más comunes que se utilizan en la industria.

2.2.1. Uniones Soldadas

La soldadura es un proceso de unión de dos piezas de metal como resultado de una difusión de los átomos de las piezas soldadas en la región de unión (soldadura). Se realiza calentando las piezas unidas hasta el punto de fusión y fusionándolas (con o sin material de aportación) o aplicando presión sobre las piezas en estado frío o calentado (Molera Solá, 1992) el resultado final se puede apreciar en la figura 1.

Entre las ventajas de las uniones soldadas destacan su alta resistencia y hermeticidad, así como su rentabilidad, ya que permiten diseños simples y facilitan la mecanización y automatización del proceso. No obstante, también presentan ciertas desventajas, como la generación de esfuerzos internos, distorsiones, alteraciones en la microestructura del material y posibles efectos nocivos.

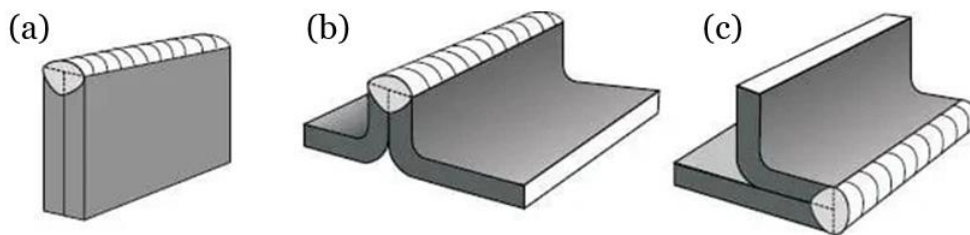


Figura 1. Resultado final de la unión de dos sustratos realizado mediante soldadura: (a) soldadura junta de borde en unión de borde, (b) soldadura junta de borde en una unión a tope con brida y (c) soldadura junta de borde en una unión en esquina con brida (Tipos de Uniones Soldadas: Guía Completa Sobre Soldaduras y Usos, n.d.).

2.2.2. Uniones mecánicas

Las fijaciones mecánicas son componentes utilizados para fijar partes de manera mecánica. Estas fijaciones pueden incluir una amplia gama de dispositivos como tornillos, pernos, tuercas, remaches, grapas, pasadores, entre otros.

Remachado

Un remache es un sujetador mecánico de alta resistencia que permanece en su lugar de forma permanente una vez fijado. El diseño presenta una cabeza a un lado y un cilíndrico, conocido como cola, al otro como se aprecia en la figura 2. El proceso de remachado es un método de unión mecánica que,

como su nombre indica implica el uso de remaches para unir dos o más piezas. Hay muchos tipos de remaches en el mercado y cada uno ofrece beneficios únicos para diversos trabajos de sujeción (Speck, 2018).

Entre las ventajas de las uniones remachadas se encuentran su resistencia, fiabilidad y carácter permanente, asimismo de ofrecer una gran versatilidad a un costo relativamente bajo. Sin embargo, también presentan algunas desventajas, como la necesidad de acceso a ambas caras de las piezas para realizar la unión, la posibilidad de generar puntos de corrosión y la dificultad para desmontar la estructura en caso de ser necesario.

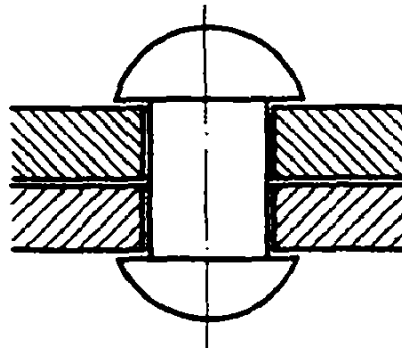


Figura 2. Esquema de la unión mediante remache (AULA DE MECANICA: AMOVIBLES, n.d.).

Tornillos y pernos

Una unión roscada es una unión desmontable basada en la combinación de dos piezas. En una de esas piezas, habitualmente llamada tornillo, perno o espárrago, se han labrado una rosca helicoidal por el exterior y en la otra, llamada tuerca, una rosca helicoidal complementaria por el interior (figura 3). Para realizar la unión hay que girar el tornillo respecto a la tuerca alrededor del eje de la hélice. Normalmente, el sistema incluye una o más piezas entre el tornillo y la tuerca, que quedan comprimidas y unidas entre sí al apretar el tornillo sobre la tuerca (Speck, 2018).

Entre las ventajas de las uniones atornilladas destacan su facilidad de montaje y desmontaje sin necesidad de destruir la unión, así como su alto grado de estandarización, lo que permite unir materiales diversos. No obstante, también presentan ciertas desventajas, como la compresión de las piezas unidas, alta de estanqueidad, la susceptibilidad a la corrosión y la necesidad de una preparación previa en las superficies a unir.

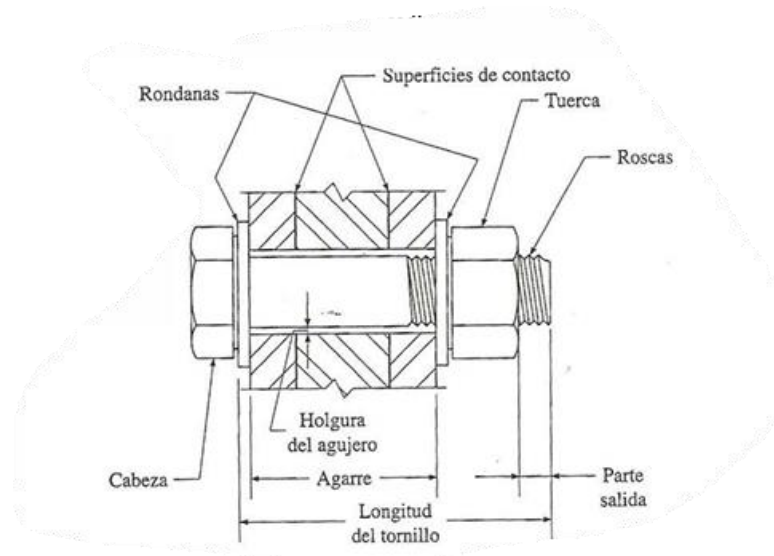


Figura 3. Esquema de las partes que intervienen en la unión atornillada (Viñals Burgo, 2008).

2.2.3. Interferencia y pretensado ajustado

La interferencia ocurre cuando dos partes están diseñadas para tener dimensiones ligeramente diferentes de manera que, al unirse, una parte "interfiere" con la otra. Esto significa que una parte es ligeramente más grande que la otra en la dimensión de montaje (figura 4), lo que requiere una fuerza para ensamblar las partes juntas. Esta interferencia proporciona una unión ajustada y a menudo se utiliza para asegurar que las partes permanezcan unidas sin juego ni movimiento (Benatar, 2017; Childs, 2021; "Mechanical Fastening," 2009; Simmons et al., 2012).

Entre las ventajas de las uniones por interferencia destacan su solidez, alta resistencia a la fatiga y simplicidad estructural. Sin embargo, también presentan desventajas, como la complejidad del ensamblaje, la necesidad de altos niveles de precisión y el riesgo de deformaciones permanentes en las piezas unidas.

El pretensado ajustado es un método de ensamblaje en el cual se aplica una carga de compresión inicial a los sujetadores (como tornillos, pernos, etc.) antes de aplicar cualquier carga externa al ensamblaje (figura 4). Esto se hace para prevenir el aflojamiento de los sujetadores debido a las vibraciones o las cargas cíclicas a las que pueda estar expuesto el sistema. Al aplicar una fuerza de pretensado, se aumenta la fricción entre las superficies de las partes unidas y los sujetadores, lo que ayuda a mantener la integridad del ensamblaje con el tiempo (Benatar, 2017; Childs, 2021; "Mechanical Fastening," 2009; Simmons et al., 2012).

Entre las ventajas de las uniones por pretensado ajustado destacan su gran resistencia al aflojamiento, mejora de distribución de cargas y un aumento en la rigidez. Sin embargo, también presentan desventajas, como equipos y procedimientos especiales, sensibles a la sobrecarga y requieren de mantenimiento de las cargas.

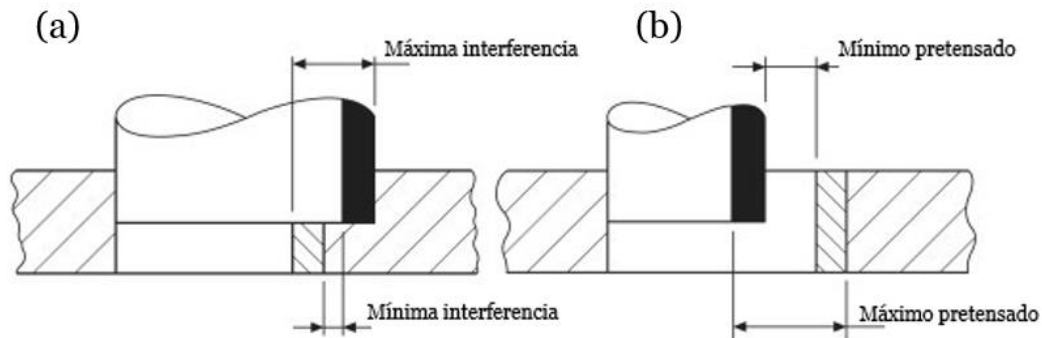


Figura 4. (a) Esquema de interferencia y (b) Esquema pretensado ajustado (Simmons et al., 2012).

2.2.4. Uniones adhesivas

Las uniones adhesivas son un método de unión que implica el uso de adhesivos para unir materiales. En lugar de depender de la interacción física entre las superficies como en las uniones mecánicas, los adhesivos se utilizan para formar una unión fuerte entre dos sustratos como se aprecia en la figura 5 (Adams, 1997).

Los adhesivos son materiales que desempeñan un papel crucial en una amplia variedad de aplicaciones. Permiten la unión de superficies y materiales de manera eficiente y duradera. La evolución de la tecnología de adhesivos ha llevado al desarrollo de fórmulas especializadas capaces de satisfacer las demandas específicas de cada sector, mejorando la resistencia, la durabilidad y la versatilidad de las uniones adhesivas.

Entre las ventajas de las uniones adhesivas destacan su distribución uniforme de las cargas, unión de materiales diferentes y capacidad para cerrar juntas. Sin embargo, también presentan desventajas, como la unión es afectada por la temperatura, humedad y productos químicos, además de falta de adherencia en algunas superficies (Hartshorn, 1986).

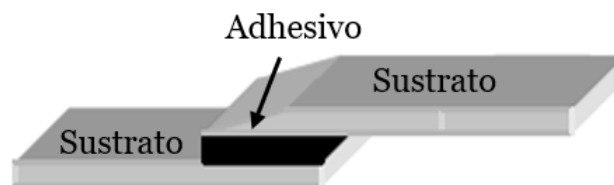


Figura 5. Esquema típico de una unión por adhesivo (Sánchez Matrán, 2010).

Dado que las uniones adhesivas son el eje central de este estudio, el siguiente apartado se centra en sus características principales, componentes y diferentes variantes.

2.3. Introducción a las Uniones Adhesivas

Como se han mencionado en una sección anterior, las uniones adhesivas están formadas por la combinación de dos o más superficies unidas mediante un adhesivo, el cual actúa como medio de transferencia de esfuerzos entre los componentes. Este tipo de unión se caracteriza por su capacidad para distribuir tensiones de forma uniforme, su ligereza y su adaptabilidad a diversos materiales y geometrías.

Las uniones adhesivas habituales están compuestas por sustratos y adhesivos como se puede apreciar en la figura 6. Los sustratos son los materiales que se pretenden unir mediante el adhesivo (Bañón et al., 2019), mientras que el adhesivo se define como una sustancia no metálica capaz de unir materiales por pegado de superficies (adhesión), proporcionando a la unión una resistencia interna adecuada (cohesión) (UNE-EN 923, 2016).

En este contexto, la adhesión se entiende como el estado en el que dos superficies se mantienen unidas mediante uniones interfaciales, y la cohesión, por su parte, es el estado en el que las partículas de una sustancia simple se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares (UNE-EN 923, 2016). Finalmente, la interfase se refiere a la fase con características distintas a las del adhesivo y los sustratos, cuyas propiedades influyen directamente en el comportamiento de la unión (Bañón et al., 2019).



Figura 6. Esquema de la disposición de los diferentes elementos que intervienen en una unión mediante adhesivos (elaboración propia).

El material y formato en el que se presentan cada uno de los componentes antes mencionados depende del tipo de unión adhesiva y las particularidades específicas de la unión.



2.3.1. Tipo de uniones adhesivas

El diseño de uniones adhesivas debe realizarse cuidadosamente para garantizar un funcionamiento adecuado y seguro. Uno de los principios fundamentales es que el área de contacto entre los componentes unidos debe ser lo más extensa posible (Berrocal, 2007). Al aumentar la superficie de unión, se favorece una mejor distribución de las tensiones, lo cual incrementa la resistencia global de la unión y reduce el riesgo de fallos prematuros. Por el contrario, si el área de unión es demasiado reducida, las tensiones se concentran en zonas localizadas, lo que puede comprometer la integridad del conjunto (B. R. K. Blackman et al., 2009).

Sin embargo, el área no es el único aspecto a tener en cuenta. Es igualmente importante asegurar que el mayor porcentaje posible del área adherida participe activamente en la transferencia de cargas. Para ello, la preparación de las superficies juega un papel clave, ya que la presencia de contaminantes, rugosidad inadecuada o falta de compatibilidad entre materiales puede impedir una adhesión efectiva en ciertas zonas (B. R. K. Blackman et al., 2009).

Otro factor determinante es la dirección de aplicación de las cargas. El adhesivo debe estar solicitado en la dirección en la que presenta su máxima resistencia, generalmente a cortante, mientras que deben evitarse tensiones en la dirección en la que es más débil, como la tracción perpendicular a la capa de adhesivo (Bañón et al., 2019).

Asimismo, la geometría de la unión, el tipo de adhesivo seleccionado, las condiciones ambientales (como temperatura y humedad), y los ciclos de carga esperados a lo largo de la vida útil también son factores críticos en el diseño. El espesor del adhesivo, por ejemplo, debe ser cuidadosamente controlado: un espesor excesivo puede disminuir la rigidez del conjunto y favorecer la aparición de burbujas o vacíos internos, que actúan como puntos de concentración de esfuerzos. Por otro lado, un espesor demasiado delgado puede dificultar la distribución uniforme del adhesivo sobre la superficie, comprometiendo la adherencia y la capacidad de absorción de tensiones. Además, la forma de los extremos de la unión (por ejemplo, esquinas agudas frente a transiciones suaves) puede afectar significativamente al comportamiento bajo carga, siendo preferible diseñar geometrías que eviten concentraciones excesivas de esfuerzo (B. Blackman et al., 2012).

Por tanto, lograr una unión adhesiva eficaz no depende únicamente de aplicar el adhesivo entre dos superficies, sino de un diseño integral que considere todos estos factores en conjunto. Solo así se puede asegurar un desempeño estructural fiable y duradero a lo largo del tiempo.

En este sentido, el tipo de unión empleada influye de forma significativa en la resistencia y comportamiento final de la unión. Por ello, resulta fundamental conocer las distintas configuraciones posibles.

Entre las posibles clasificaciones la Norma UNE-EN 923:2016 establece una clasificación que define los cuatro principales tipos de uniones adhesivas que son las mostradas en la figura 7, proporcionando una base común para su identificación y análisis.

En primer lugar, la unión más simple es la unión por solapamiento, como se muestra en la figura 7a. Esta se obtiene al colocar un adherente parcialmente sobre otro y pegar juntas las partes solapadas. Se trata de una unión sencilla y comúnmente utilizada, ya que permite una buena distribución de las tensiones y es fácil de fabricar.

Además, si se superponen dos uniones por solapamiento, se obtiene una unión por doble solapamiento, como se observa en la figura 7b. Esta configuración se logra al colocar uno o dos adherentes sobre uno o dos adherentes adicionales, pegando las zonas de solape. Su principal ventaja es que mejora la rigidez del conjunto y reduce las concentraciones de tensión, proporcionando una mayor resistencia mecánica que la unión simple.

Por otro lado, también se encuentra la unión a tope, representada en la figura 7c. Esta se forma al unir dos superficies perpendiculares a las superficies principales de los adherentes. Aunque es una unión fácil de ejecutar cuando no se dispone de área para solapar, su resistencia suele ser menor debido a que concentra más esfuerzos en la línea de adhesión.

Para finalizar, mencionar la unión biselada, mostrada en la figura 7d. Esta se obtiene cortando segmentos angulares idénticos, normalmente con un ángulo inferior a 45° respecto al eje mayor de los adherentes, y pegando las superficies inclinadas de manera que ambos elementos queden en un mismo plano. Este tipo de unión amplía el área efectiva de contacto, favoreciendo una mejor transferencia de carga y una distribución más homogénea de las tensiones, lo que la hace más resistente que la unión a tope.



Figura 7. Tipos de uniones adhesivas según la norma: (a) unión por solapamiento, (b) unión por doble solapamiento, (c) unión a tope y (d) unión biselada (UNE-EN 923, 2016).

2.3.2. Caracterización de uniones adhesivas

Para determinar las propiedades de cualquier tipo de unión es necesario realizar ensayos experimentales sobre dichas uniones. La exactitud y reproductibilidad de los resultados de los ensayos dependerá de



las condiciones sobre las cuales se lleva a cabo en el proceso (Núñez, 2013). Para comprobar que las uniones adhesivas se realizan correctamente se utilizan dos tipos de ensayos.

Ensayos no destructivos

Las técnicas de evaluación no destructivas consisten en detectar los defectos de la unión, determinar las propiedades del adhesivo y asegurar el rendimiento de unión sin alterar las propiedades del material (Bermejo López, 2016). Los métodos de ensayos no destructivos que se aplican en la inspección de uniones adhesivas son los siguientes:

- Inspección visual: Con la inspección visual se pueden evaluar los materiales, los recubrimientos o el proceso de curado. Esta técnica permite revelar defectos como fracturas en los sustratos o en el adhesivo, despegues, delaminaciones, impactos, inclusiones de elementos extraños, aparición de burbujas, o cualquier otro defecto mecánico.
- Inspección mediante ultrasonidos: Es el método más sencillo, fiable y empleado para uniones adhesivas. Se usan ultrasonidos entre 2.25 y 10 MH. Existen diferentes técnicas, pero las más utilizada es el eco de un pulso de contacto donde se emplea el mismo transductor para emitir y detectar la reflexión del pulso de ultrasonidos.
- Radiografía de rayos-X: Permiten realizar inspecciones en un solo barrido, pero resulta un método muy caro. Puede detectar discontinuidades, variaciones de densidad y variaciones de absorción de rayos-X en los materiales.
- Radiografía de neutrones: Posee ciertas similitudes con el método anterior, con la ventaja de no ser tan sensible a las variaciones de densidad o de espesor de los materiales. Con este método se detectan los huecos o porosidades que pueda presentar el adhesivo, ya que los hidrógenos que posee el polímero que constituye el adhesivo absorben los neutrones y lo hacen opaco.
- Test de la moneda: Es el método más simple. Consiste en golpear la estructura de la unión adhesiva con una moneda y comprobar los cambios en el tono del sonido producido, normalmente relacionados con despegues grandes.
- Emisión acústica: Este método resulta ventajoso cuando se quiere detectar corrosión interna en los metales y adhesivo degradado por la humedad. Su objetivo es la detección de ondas acústicas o mecánicas en los materiales (Bermejo López, 2016).

Ensayos mecánicos o destructivos

Las técnicas de evaluación destructivas, como su nombre indica, modifican las propiedades de los materiales utilizados, a diferencia de las técnicas anteriores. Al realizar ensayos mecánicos, uno de los aspectos fundamentales a considerar es el tipo de esfuerzo al que se someterá la pieza. Según la Norma UNE-EN 923:2016, se pueden identificar los esfuerzos más representativos que se aplican en este tipo de ensayos:

- Cizallamiento por tracción (Figura 8a): Modo de aplicación de una fuerza de tracción en una unión que actúa en el plano de la línea de pegado.
- Pelado (Figura 8b): Modo de aplicación de una fuerza sobre una unión en la que uno o ambos adherentes son flexibles y en el que el esfuerzo se concentra en una línea de separación.
- Tracción (Figura 8c): Modo de aplicación de una fuerza de tracción perpendicular al plano de una unión entre adherentes rígidos y que se reparte uniformemente sobre toda la superficie de la línea de pegado.
- Separación (Figura 8d): Modo de aplicación de una fuerza sobre una unión entre adherentes rígidos que no es uniforme sobre toda la superficie y que presenta un esfuerzo concentrado en un borde.
- Cizallamiento por torsión (Figura 8e): Modo de aplicación de una fuerza de torsión en una unión que actúa en el plano de la línea de pegado.

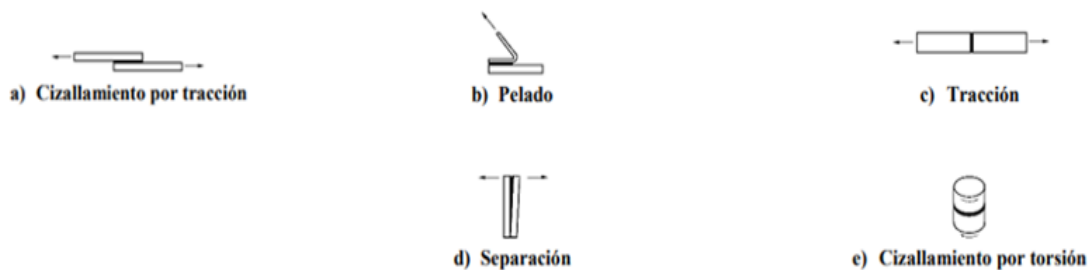


Figura 8. Diferentes esfuerzos en ensayos mecánicos según la norma: (a) esfuerzo por cizallamiento por tracción, (b) esfuerzo por pelado, (c) esfuerzo por tracción, (d) esfuerzo por separación y (e) esfuerzo por cizallamiento por torsión. (UNE-EN 923, 2016)

Asimismo, es importante considerar diversos factores además del tipo de esfuerzo, con el fin de seleccionar el ensayo más adecuado. Entre estos factores se incluyen el tipo de material a ensayar, el equipo disponible, la normativa aplicable y otros aspectos relevantes.

Teniendo en consideración todo esto, existen una gran cantidad de ensayos destructivos que se pueden ejecutar, sin embargo, tras analizar el caso de uniones adhesivas se han optado por los más típicos.

En primer lugar, la resistencia a la tracción de uniones a tope, regulada por la norma UNE-EN 15870:2009, es una prueba mecánica fundamental utilizada para evaluar la capacidad de una unión adhesiva para soportar fuerzas de tracción. Un esquema básico del ensayo puede observarse en la figura

9. Este tipo de ensayo resulta especialmente relevante en sectores como la industria automotriz y aeroespacial, donde la fiabilidad estructural es crítica.

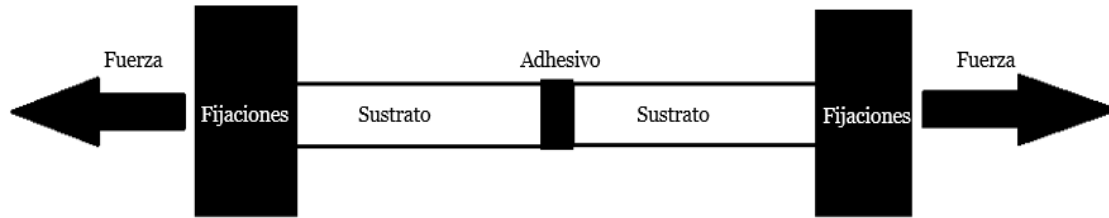


Figura 9. Esquema de ensayo a tracción en una unión a tope (elaboración propia).

Por otro lado, tenemos tres tipos de ensayos de Pelados, regulados tanto a 90° (UNE-EN 28510-1:2014), a 180° (UNE-EN ISO 8510-2:2011), como en T (UNE-EN ISO 11339:2022). Es una prueba mecánica diseñada para evaluar la fuerza necesaria para separar dos materiales unidos por un adhesivo cuando se aplica una fuerza de pelado. Se puede apreciar los tipos de uniones en la figura 10. Tiene una gran utilización en sectores como la industria del embalaje.

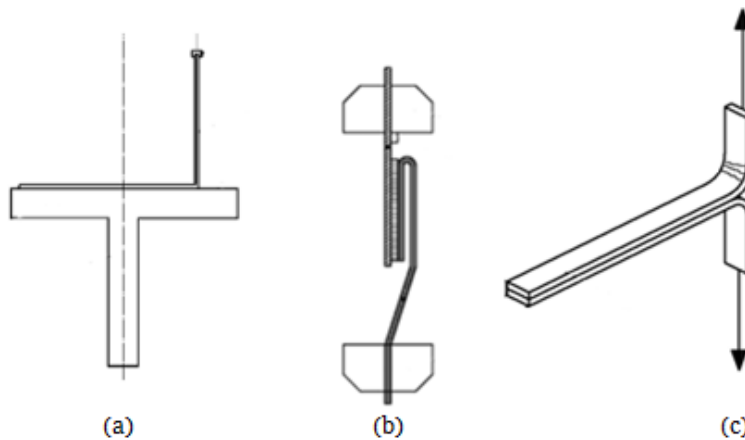


Figura 10. (a) Unión realizadas por pelado a 90° (UNE-EN 28510-1, 2014). (b) Unión realizadas por pelado a 180° (UNE-EN_ISO_8510-2, 2011). (c) Unión realizadas por pelado en T (UNE-EN_ISO_11339, 2022).

Para finalizar, hay que destacar cizallamiento por tracción de uniones solapadas (UNE EN-ISO 1465:2009). Es un ensayo destructivo que sirve tanto para evaluar la resistencia interna del adhesivo como la preparación superficial de los sustratos. Un esquema básico del ensayo puede observarse en la figura 11. Se usa principalmente en aplicaciones de ingeniería y se caracteriza por la fuerza de unión entre dos placas solapadas al ser sometida a un esfuerzo de cortadura. Este ensayo es el más utilizado y ampliamente estudiado mecánicamente puesto que es económico, versátil, fácil de ejecutar y, además, proporciona valores cualitativos fácilmente comparables.

Para caracterizar el comportamiento de la unión, se realizan bajo la geometría característica que dicta la norma para este tipo de ensayos.

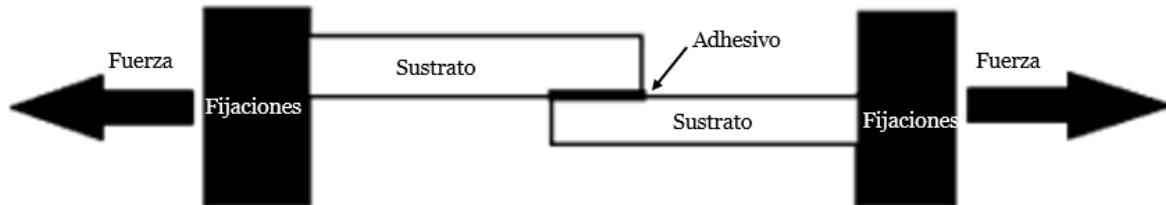


Figura 11. Esquema de ensayo a tracción por uniones solapadas (elaboración propia).

2.3.3. Forma en la que se produce la fractura

Para evaluar una unión adhesiva se debe considerar tanto la resistencia mecánica a la separación como la forma de romperse. Por eso, es importante la inspección de la superficie de la fractura, ya que nos podrá indicar cual ha sido el fallo predominante en el sistema. El modo en el que falla se puede clasificar siguiendo unos modelos, hallándose los principales recogidos en la Norma UNE-EN ISO 10365.




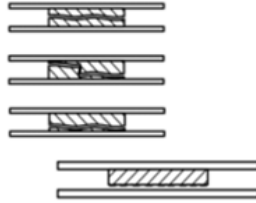
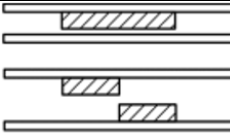
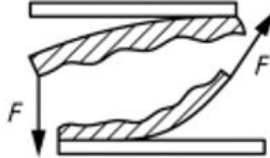

	Modelos de fallo o rotura	Designación
Adherente	 Rotura de uno o ambos adherentes (fallo del adherente)	SF
	 Rotura en un adherente (fallo cohesivo del adherente)	CSF
	 Fallo en la laminación (delaminación)	DF
Adhesivo	<p>Tipos de fallos cohesivos</p>  <p>Fallo cohesivo</p> <p>Fallo cohesivo especial</p> <p>Fallo con blanqueamiento por tensión del adhesivo especial</p>	CF SCF SWCF
	 Fallo adhesivo	AF
	 Fallo adhesivo y cohesivo con pelado	ACFP
Corrosión en la interfase	 Separación debido a la corrosión en la línea de unión	COR

Tabla 1. Modelos de fallo (UNE-EN_ISO_10365, 2022).



- **Fallo del adherente.** En este tipo de fallo, el sustrato rompe antes que la unión por la interfase sustrato-adhesivo o por el propio adhesivo. Esto ocurre cuando la resistencia de la unión está sobredimensionada, es decir, las fuerzas de adhesión y cohesión de la unión adhesiva son superiores a las fuerzas de cohesión de los sustratos.
- **Fallo adhesivo.** Se trata de una rotura en una unión adhesiva en la que la separación aparece claramente visible en la interfase adhesivo-sustrato
- **Fallo cohesivo.** En este caso, se produce la rotura de un montaje por adhesión en la que la separación aparece claramente visible en el adhesivo o en el sustrato.
- **Fallo mixto.** Este fallo es una combinación de los tipos de fallo adhesivo y cohesivo, siendo el modo de fallo más común. Si se produce, se debe especificar el porcentaje aproximado para cada modelo de rotura a continuación de cada designación.
- **Fallo por corrosión en la interfase.** Se produce como consecuencia de la disolución del metal en las zonas próximas al borde de grano (UNE-EN 923, 2016).

2.4. Características de los adhesivos

Las propiedades de una unión mediante adhesivos están profundamente condicionadas por las características del propio adhesivo. La eficacia de la unión no depende únicamente del diseño o del tipo de superficie adherida, sino que está directamente relacionada con las propiedades químicas y mecánicas del adhesivo utilizado.

Entre las variables más relevantes que deben considerarse se encuentran la composición del adhesivo, ya que esta determina aspectos clave como la resistencia mecánica, la flexibilidad, la resistencia térmica o la capacidad de curado. Asimismo, la metodología de aplicación juega un papel crucial, incluyendo parámetros como el grosor de la capa adhesiva, el tiempo abierto, la presión de ensamblaje o las condiciones ambientales durante el proceso.

Otros factores importantes son el método de curado, la compatibilidad entre el adhesivo y los sustratos, y el tiempo de vida útil del adhesivo una vez mezclado o abierto. Todos estos elementos influyen significativamente en el comportamiento final de la unión, tanto en términos de resistencia como de durabilidad.

Por ello, la elección del adhesivo y su correcta aplicación deben considerarse con el mismo nivel de importancia que el diseño estructural de la propia unión.

2.4.1. Composición de adhesivos

La composición química de los adhesivos varía considerablemente dependiendo del tipo de adhesivo y su aplicación específica (Bermejo López, 2016). A continuación, se describen los principales componentes de un adhesivo:



- Producto base. Puede tratarse de un único producto, de una mezcla de varios productos o de modificaciones químicas de ciertos productos base. En la mayoría de los casos, el producto base es una mezcla de monómeros, oligómeros y/o polímeros (Bermejo López, 2016). Es el que está presente en mayor porcentaje y el que confiere al adhesivo sus características principales. Algunos de los más utilizados se encuentran la resina epoxi. Posee alta resistencia estructural, buena adherencia a metales y termofijación estable. También hay que destacar, el Poliuretano. Posee gran elasticidad y resistencia química; ideal para calzado, automoción o madera.
- Aditivos. Sustancias que modifican las características físico-químicas del producto base, tanto antes como después del proceso de curado. Entre los aditivos más comunes se encuentran los iniciadores, que activan e inician la reacción de polimerización en adhesivos monocomponentes reactivos, y los agentes de reticulación, que permiten termoestabilizar ciertos adhesivos reactivos. Además, existen aditivos que actúan como diluyentes, cuya función principal es reducir la concentración de sólidos y la viscosidad del adhesivo. También se emplean colorantes, que aportan color al adhesivo, y antioxidantes, que previenen fenómenos de oxidación. Se añaden asimismo plastificantes, para modificar la temperatura de transición vítrea; agentes de tack (pegajosidad), que proporcionan untuosidad al adhesivo; y surfactantes o tensioactivos, que mejoran la estabilidad de los adhesivos emulsionados. Finalmente, es posible incorporar sustancias fluorescentes, que permiten localizar el adhesivo en la pieza mediante detectores; carriers o soportes sólidos, empleados en adhesivos piezoeléctricos; agentes de acoplamiento o promotores de la adhesión, que mejoran la durabilidad mediante la formación de enlaces primarios con el sustrato; y estabilizadores, que prolongan la vida útil del adhesivo (Bermejo López, 2016).
- Cargas/espesantes. Se trata de sustancias que modifican la reología del adhesivo antes del proceso de curado, así como las características mecánicas del adhesivo curado. Entre los espesantes más habituales se encuentra la sílice coloidal, que incrementa la viscosidad del adhesivo y ayuda a controlar el escurrimiento, y el carbonato cálcico, talco o mica, que no solo mejoran el comportamiento mecánico del adhesivo, sino que además contribuyen a reducir costes (Bermejo López, 2016).
- Disolventes. Estas sustancias solo se emplean en los adhesivos en disolución y los adhesivos en contacto. Favorecen la procesabilidad y la untuosidad (tack) del adhesivo. Algunos ejemplos comunes son el agua, utilizada en adhesivos acuosos, y la acetona, típica en adhesivos industriales de contacto.
- Endurecedores. Se emplean como segundo componente en los adhesivos bicomponentes. Provocan la reacción química del proceso de curado (Bermejo López, 2016). Entre los más comunes se encuentran las aminas, que permiten el curado a temperatura ambiente o elevada, y los isocianatos, que facilitan el curado en presencia de humedad o calor, siendo frecuentes en adhesivos de poliuretano.



2.4.2. Metodologías de aplicación de adhesivos

Existen una gran variedad de adhesivos que ocasionan numerosos métodos y equipos de aplicación. La elección del método de aplicación debe basarse en el tipo de adhesivo, la naturaleza del producto y los requisitos de la superficie, entre otros factores. Se podrán diferenciar muchos tipos, no obstante, se van a describir los métodos principales de aplicación de adhesivos.

- Aplicación Manual

La aplicación manual de adhesivos incluye varios métodos adaptados a distintos tipos de superficies y niveles de precisión. En primer lugar, el uso de brochas o pinceles es ideal para zonas pequeñas o de difícil acceso, permitiendo trabajos minuciosos. Por otro lado, el rodillo, en cambio, se emplea para distribuir el adhesivo de forma uniforme sobre superficies amplias, siendo muy útil en procesos más extensos. Para finalizar, la espátula resulta eficaz en superficies planas, ya que facilita una aplicación controlada y asegura una capa pareja del adhesivo. Se tratan de la más económicas para series pequeñas y aquellas que requieren menor inversión inicial, sin embargo, son menos precisos y lentos.

- Aplicación por Aerosol

Los adhesivos en aerosol permiten una aplicación rápida y uniforme, especialmente útil en grandes superficies, es una opción de coste medio-bajo, no obstante, puede presentar pérdidas por sobrepulverización y generar residuos. En primer lugar, el método en spray es muy común en sectores como el automotriz, ya que proporciona una capa homogénea en poco tiempo. Asimismo, el aerosol manual, que se presenta en envases presurizados, permite cubrir de forma eficiente superficies grandes o con geometrías irregulares.

- Aplicación con Pistola

La aplicación con pistola implica un coste medio-alto debido a la necesidad de equipos específicos, pero ofrece una mayor precisión y control, especialmente útil en producciones medias o grandes. Entre los métodos más comunes están la pistola de calor (hot melt), que funde adhesivos termofusibles para aplicarlos en estado líquido y solidificarlos al enfriarse, y la pistola neumática, que utiliza presión de aire para aplicar adhesivos de alta viscosidad con exactitud en patrones definidos.

- Aplicación Automática

La aplicación automática es la técnica más costosa, ya que requiere una alta inversión en maquinaria especializada y programación. Sin embargo, proporciona máxima precisión, repetibilidad y eficiencia en líneas de producción a gran escala. Destacan las máquinas dispensadoras, que dosifican el adhesivo con gran regularidad en procesos automatizados, y los robots aplicadores, que usan brazos robóticos para colocar el adhesivo con exactitud en tareas de alta complejidad.



- Aplicación por Inmersión

La aplicación por inmersión consiste en sumergir las piezas en un baño de adhesivo, asegurando una cobertura total y homogénea. Es una opción de coste medio-bajo, apropiada para la fabricación en serie de piezas pequeñas, especialmente cuando se requiere una impregnación completa en poco tiempo y sin necesidad de precisión localizada.

- Aplicación por Transferencia

La aplicación por transferencia utiliza cintas adhesivas con el adhesivo preaplicado sobre una base flexible, que al presionarse transfieren el adhesivo de manera rápida y limpia. Esta técnica es de bajo coste, presenta gran limpieza y no requiere tiempos de curado, lo que la hace ideal para tareas como embalaje o ensamblaje de componentes electrónicos.

- Aplicación por Serigrafía

La serigrafía se utiliza principalmente para adhesivos de baja viscosidad, permitiendo aplicar patrones precisos sobre superficies planas. Su coste es medio, y resulta especialmente adecuada en sectores como la electrónica o la impresión técnica, donde se exige una alta exactitud en la aplicación del adhesivo.

- Aplicación con Inyección

La aplicación con inyección se realiza mediante sistemas que introducen adhesivo directamente en cavidades o espacios cerrados. Es común en procesos de sellado o fijación estructural que requieren una penetración profunda del adhesivo (Petrie, 20007). Representa un método de coste alto, debido a la necesidad de equipos específicos y control detallado del proceso.

2.4.3. Clasificación de adhesivos

Hay numerosas formas de clasificar los adhesivos, pudiéndose destacar su clasificación según su composición química, uso, método de aplicación, método de curado, reactividad, y por su origen, entre otros. Al realizar la clasificación según su origen, podemos dividir los adhesivos en naturales o sintéticos. Los adhesivos de origen natural son aquellos que derivan de fuentes naturales, como plantas, animales o microorganismos, y de fuentes renovables. Asimismo, pueden ofrecer ventajas como biodegradabilidad, menor impacto ambiental y, en algunos casos, propiedades adhesivas comparables a los adhesivos sintéticos. Algunos ejemplos comunes incluyen adhesivos a base de almidón de maíz, látex de árbol, etc.

Por otro lado, los adhesivos de origen sintético son aquellos que se fabrican mediante procesos químicos, utilizando componentes derivados principalmente del petróleo y otros recursos no renovables. Estos adhesivos suelen tener una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias debido a su versatilidad y propiedades adhesivas ajustables. A menudo se prefieren por su resistencia,



durabilidad, facilidad de aplicación y capacidad para adherir una variedad de sustratos diferentes. Sin embargo, su producción y uso pueden plantear preocupaciones ambientales debido a su composición derivada del petróleo y su impacto potencial en la biodegradabilidad y el medio ambiente. Algunos ejemplos comunes de estos adhesivos sintéticos incluyen adhesivos epoxi, poliuretano, cianoacrilato y vinílicos.

Otra de las clasificaciones empleadas se apoya en el mecanismo de formación de la junta adhesiva. Así, se pueden distinguir dos grandes grupos de adhesivos. Los adhesivos prepolimerizados, es decir, aquéllos cuyo polímero ya existía antes de ser aplicado el adhesivo sobre la unión; y adhesivos reactivos. Estos últimos se caracterizan porque el adhesivo en estado líquido, viscoso, gel, etc. se halla constituido por monómeros o cadenas oligómeras que polimerizan y/o se entrecruzan durante el proceso de polimerización que ocurre cuando tal adhesivo se ubica entre los sustratos a unir (Madrid, 1997). Dentro de estos grandes grupos se definen diversas subclases.

Adhesivos Prepolimerizados

Los adhesivos prepolimerizados experimentan una polimerización parcial antes de su aplicación final. Existe una gran variedad de tipos, tanto en fase líquida como sólidas. Se destaca el caucho natural, los cementos o adhesivos en base a PVC en la fase líquida y los adhesivos de contacto o las cintas adhesivas, y los termofusibles o Hot Melts en la fase sólida (Madrid, 1997; Sánchez Matrán, 2010).

Adhesivos Reactivos

Los adhesivos reactivos son aquéllos que polimerizan durante la unión adhesiva, es decir, cuando se hallan entre los sustratos que se pretende ensamblar.

La profundidad de curado de un adhesivo reactivo está estrechamente vinculada con el nivel de activación de su proceso de polimerización. De manera general, los adhesivos monocomponentes, cuyo curado se desencadena por acción superficial (por ejemplo, por humedad, luz o temperatura), presentan limitaciones en la profundidad de curado, ya que la reacción solo avanza desde la superficie hacia el interior. En cambio, los adhesivos bicomponentes, donde la polimerización se activa al combinar dos componentes, inician el proceso en todo el volumen del adhesivo, lo que permite obtener profundidades de curado prácticamente ilimitadas (Madrid, 1997; Sánchez Matrán, 2010).

El curado de los adhesivos reactivos tiene lugar según dos posibles mecanismos:

- Poliadición: por adición al abrirse un doble enlace de un monómero que lo contenga.
- Policondensación: por condensación de moléculas sencillas en la reacción de monómeros disfuncionales con grupos terminales reactivos.



Las poliadiciones son reacciones en cadena y tienen velocidades de reacción elevadas. Por el contrario, las policondensaciones son reacciones lentas que producen un incremento paulatino y continuo de la viscosidad del sistema adhesivo (Madrid, 1997; Sánchez Matrán, 2010).

Dentro de los adhesivos reactivos, es posible distinguir tres categorías principales según sus propiedades mecánicas y aplicaciones: rígidos, tenaces y flexibles.

Los adhesivos reactivos rígidos se caracterizan por generar uniones con elevada rigidez, adecuadas para aplicaciones estructurales donde se requiere una resistencia mecánica considerable y no se admiten deformaciones (Madrid, 1997; Sánchez Matrán, 2010). Estos se clasifican según su capacidad para rellenar holguras entre los sustratos. Donde encuentran los adhesivos para sustratos coincidentes, como los anaeróbicos, que polimerizan en ausencia de oxígeno y en presencia de iones metálicos (Sánchez Matrán, 2010). Por otro lado, los adhesivos con capacidad de relleno de holgura, como los epoxis rígidos, permiten uniones estructurales incluso cuando existen pequeñas separaciones entre las piezas, gracias a su presentación bicomponente en forma de resina y endurecedor.

Los adhesivos reactivos tenaces se destacan por su excelente comportamiento frente a cargas dinámicas, así como a esfuerzos de pelado y desgarro, lo que los hace adecuados para aplicaciones donde se requiere una combinación de resistencia y cierta capacidad de deformación (Madrid, 1997; Sánchez Matrán, 2010). Al igual que los rígidos, se dividen según su capacidad de relleno. En el grupo de adhesivos para sustratos coincidentes, se encuentran los anaeróbicos tenaces, diseñados para soportar sollicitaciones mecánicas más severas, y los cianoacrilatos tenaces, que combinan curado rápido con mayor resistencia estructural (Madrid, 1997; Sánchez Matrán, 2010). Dentro de los adhesivos con capacidad intermedia de relleno, destacan los acrílicos bicomponentes, que contienen refuerzos a base de caucho y curan tras la mezcla con un activador. Estos adhesivos ofrecen alta tenacidad, excelente durabilidad, resistencia térmica y gran capacidad estructural (Madrid, 1997; Sánchez Matrán, 2010). Finalmente, adhesivos con capacidad alta de relleno, donde destacan los epoxis tenaces, modificados con caucho, superan en comportamiento a los rígidos ante esfuerzos de pelado, mejorando la resistencia a impactos y vibraciones.

Por su parte, los adhesivos reactivos flexibles están especialmente diseñados para funciones de sellado, gracias a su elevada capacidad de deformación y adherencia sobre diversos sustratos. Dentro de esta categoría, destacan las siliconas, que se clasifican según el subproducto que liberan durante el curado: acéticas, alcoxílicas, amínicas, oxímicas y poliuretanos.

2.5. Calidad superficial.

La calidad superficial se refiere a las características intrínsecas de la superficie de un material, incluyendo su rugosidad, limpieza y energía superficial. Estas características influyen directamente en su comportamiento.

2.5.1. Energía libre superficial y mojabilidad

La energía libre superficial de un material, también llamada energía superficial o energía libre de una superficie representa la cantidad de energía asociada con su superficie. Esta energía se origina por las fuerzas intermoleculares presentes en la superficie del material, las cuales difieren de aquellas que actúan en su interior (Piña Piña et al., 2021; Rodríguez García-Cebadera & González, 2010). Al realizar una unión correctamente, es fundamental considerar el contacto físico entre el sustrato y el adhesivo. Esto puede explicarse a través de la relación entre la energía superficial y el estado de los electrones superficiales. En términos simples, si estos electrones tienen una alta energía de excitación, están siendo solicitados en varias direcciones por átomos cercanos (superficies polares) (adhesives, 2003). Por el contrario, cuando las superficies están en reposo, su energía de excitación es baja, como ocurre en las superficies no polares. En consecuencia, un líquido solo podrá humedecer sólidos cuya energía superficial sea mayor que la suya. Un claro ejemplo es el agua, que se adhiere bien a una superficie metálica, pero no a una superficie de polietileno (Piña Piña et al., 2021; Rodríguez García-Cebadera & González, 2010). Al colocar una gota de adhesivo sobre una superficie limpia y lisa, se observa que, en poco tiempo, los bordes de la gota forman un ángulo muy elevado con la superficie del sólido. Este ángulo se denomina ángulo de contacto, e indica la afinidad del adhesivo con el sustrato. Aquí entra en juego una forma de medir la mojabilidad del líquido-sólido. Siendo mojabilidad la capacidad de la superficie de un sólido para disminuir la tensión superficial del área en contacto con un líquido que moja la superficie del sólido al producirse una extensión de este (Kumar et al., 2016). Si la gota de adhesivo se extiende en una película delgada con un ángulo de contacto entre $0^\circ - 90^\circ$, esto demuestra que el adhesivo ha mojado bien el sólido siendo una superficie hidrófila. Por otro lado, si la gota no se extiende por la superficie, ángulo de contacto entre $90^\circ - 180^\circ$, (Modi & Prakash, 2019) o incluso se retrae aumentando el ángulo, esto indicará la escasa o nula afinidad del adhesivo con el sustrato siendo una superficie hidrófoba, por lo tanto, a menor ángulo de contacto, superficies del sólido con mayor energía superficial que el líquido que se deposita y mojabilidad mayor, por el contrario, a mayor ángulo de contacto, superficies del sólido con menor energía superficial que el líquido que se deposita y mojabilidad nula (Jordá-Vilaplana et al., 2014; Mittal, 2007), todo esto se observa en la figura 12.

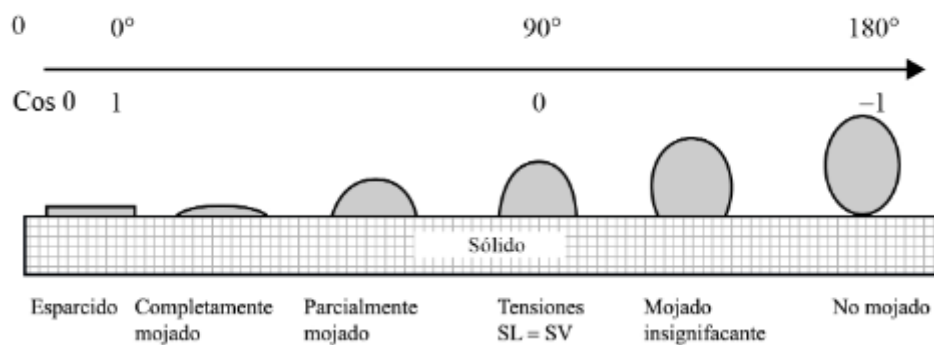


Figura 12. Representación de los casos posibles según ángulo de la gota (Piña Piña et al., 2021).

2.5.2. Rugosidad

La rugosidad se puede definir como una medida de las irregularidades y variaciones presentes en la superficie de un material como se puede apreciar en la figura 13. Estas irregularidades pueden ser picos, valles y otras desviaciones respecto a una superficie idealmente plana.

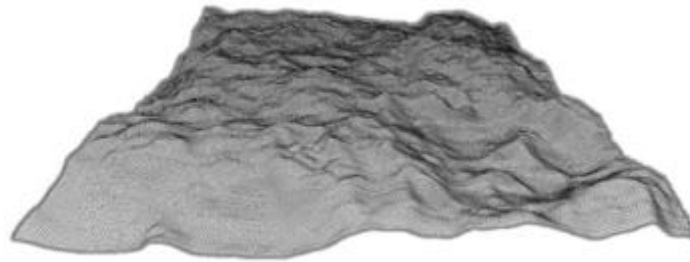


Figura 13. Representación de la rugosidad superficial de un material (UNE-EN_ISO_21920-2, 2023).

Los diferentes parámetros que definen la rugosidad superficial de un material vienen recogidos en la Norma UNE-EN ISO 21920-2:2023.

- Rugosidad aritmética media del perfil (R_a): es la rugosidad media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas. Se calcula según la fórmula.

$$R_a = \frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} |z(x)| dx \quad (1)$$

- Rugosidad media cuadrática (R_q): es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores de las ordenadas. Se calcula según la fórmula.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} z^2(x) dx} \quad (2)$$

- Rugosidad máxima (R_z): es el valor medio de la suma de la mayor altura de pico y la mayor profundidad de hoyo de cada sección, considerando todas las longitudes de sección. Se calcula según la fórmula.

$$R_z = \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} \left(\max_{j \in N_{p,i}} (Z_{ph,j}) + \max_{k \in N_{v,i}} (Z_{vd,k}) \right) \quad (3)$$

Además de los ya mencionados, existen una serie de parámetros de superficie para evaluar la calidad, estos parámetros vienen recogidos en la norma UNE-EN ISO 25178-2:2023:

- Altura media aritmética de la superficie (S_a): El parámetro de altura media aritmética es la media de los valores absolutos de las ordenadas de la superficie de escala limitada. Se calcula según la fórmula.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (4)$$

- Altura cuadrática media de la superficie (S_q): El parámetro de altura media cuadrática es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores de las ordenadas de la superficie de escala limitada. Se calcula según la fórmula.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy} \quad (5)$$

- Altura máxima de la superficie (S_z): El parámetro de altura máxima es la suma del valor de la altura máxima de pico y del valor de profundidad máxima de hoyo de la superficie de escala limitada.
- Altura del núcleo (S_k): El parámetro de altura del núcleo es la distancia entre el nivel más alto y el más bajo de la superficie del núcleo.

La presencia de rugosidad aumenta la superficie de contacto entre el líquido y el sólido, lo que puede mejorar la energía libre superficial y mojabilidad si la superficie es hidrofílica. Por otro lado, en superficies hidrofóbicas, la rugosidad puede aumentar la hidrofobicidad, causando que las gotas de agua formen ángulos de contacto mayores y se esparzan menos.

2.5.3. Activación superficial mediante granallado

La activación superficial es un proceso esencial en la preparación de materiales para mejorar su capacidad de interacción. Este proceso implica modificar la superficie de un material para aumentar su energía libre superficial, eliminando contaminantes y creando una superficie más receptiva y activa para la adhesión (Prieto et al., 2011). La activación superficial se logra mediante diversas técnicas, cada una adecuada para diferentes materiales y aplicaciones. Podemos usar ya sean físicas o química, sin embargo, las más utilizadas son el granallado, tratamiento con plasma y ácidos y álcalis. En este trabajo se han realizado una activación superficial por granallado, por lo que a continuación se detallan las principales características de este método (Zielecki et al., 2013).

El granallado consiste en la abrasión mecánica de la superficie mediante el uso de partículas (en su mayoría de ZrO_2 , Al_2O_3 o SiO_2), con distintos tamaños y geometrías, que impactan contra el material. El granallado es un proceso poco automatizado, donde prácticamente sólo se controla la presión con la que llegan las partículas a la boquilla del equipo, y el procesado se realiza girando las piezas manualmente para conseguir la cobertura total de la superficie. No obstante, produce una superficie con deformación plástica severa (De et al., 2014).

En el granallado, el resultado depende de una serie de parámetros entre los que se encuentran los siguientes:

- Presión de salida de la granalla: Como su nombre indica se asocia a la presión regulada del sistema con la que saldrá la partícula de granalla por la pistola. La presión exacta se selecciona en función de varios factores, incluidos el tipo de material de la pieza, el tipo de granalla



utilizada, y el objetivo del proceso. Una presión más alta incrementa la energía cinética del chorro, lo que mejora la capacidad de limpieza, desincrustación y generación de rugosidad, pero también puede desgastar prematuramente el material base o producir una rugosidad excesiva no deseada. Por el contrario, presiones bajas pueden generar una superficie insuficientemente tratada, con rugosidades menores y una menor capacidad de anclaje para posteriores tratamientos. En resumen, influye en la profundidad del ataque superficial, el grado de limpieza y la rugosidad final.

- **Diámetro de la boquilla:** La selección del diámetro adecuado depende del tipo de trabajo a realizar, el material de la granalla, la presión de salida y el tipo de superficie que se está tratando. Boquillas pequeñas permiten un control más fino en zonas reducidas o complejas, mientras que boquillas grandes son más eficientes en superficies extensas. Un diámetro inadecuado puede traducirse en un tratamiento irregular, con zonas mal cubiertas o con excesivo desgaste localizado. Por tanto, este parámetro influye directamente en la homogeneidad del tratamiento y en la velocidad de procesamiento.
- **Distancia boquilla-pieza:** es la distancia entre la boquilla de la pistola hasta la superficie del material, es decir, la distancia que recorre el chorro hasta alcanzar la pieza. La distancia exacta se selecciona en función de varios factores, incluidos el tipo de material de la pieza, el tipo de granalla utilizada, y el objetivo del proceso. Una distancia corta concentra la energía del chorro, mejorando la efectividad del impacto, pero puede aumentar el riesgo de erosión excesiva o dañar el sustrato. Una distancia larga, en cambio, disminuye la energía del impacto, lo que puede hacer el tratamiento menos efectivo. Esta variable influye en la uniformidad del tratamiento, la energía transmitida a la superficie y la calidad del acabado.
- **Ángulo de impacto granalla-pieza:** es el ángulo con el que impacta la granalla con el material, tendrá importancia en la forma de erosionar el material. Un ángulo perpendicular (cercano a 90°) maximiza la energía de impacto vertical, siendo más adecuado para limpieza agresiva o generación de rugosidad profunda. Ángulos oblicuos producen un barrido más superficial, ideal para acabados más suaves o sensibles. En consecuencia, este parámetro influye tanto en el patrón de erosión como en la dirección de la textura superficial y la capacidad de anclaje del sustrato (Khan et al., 2016).

2.5.4. Evaluación de la calidad superficial.

La evaluación de la calidad superficial es crucial para asegurar que los materiales y componentes cumplan con los requisitos específicos de sus aplicaciones (Leena et al., 2016). Diversas técnicas e instrumentos se emplean para medir y analizar las características de las superficies (Robinson & Thissen, 2024). A continuación, se describen algunas de las formas más típicas de evaluar la calidad superficial:

- **Perfilometría:** técnica ampliamente utilizada para medir la rugosidad y la textura de las superficies. Existen dos tipos principales de perfilómetros, contacto y ópticos. La perfilometría



de contacto, emplea una aguja o estilete (típicamente de diamante) que se desplaza físicamente sobre la superficie. La desviación vertical de la punta se registra en función de su desplazamiento horizontal, generando un perfil en 2D de la superficie. Por otro lado, la perfilometría óptica (sin contacto) utiliza principios ópticos para captar la geometría superficial sin necesidad de tocar físicamente la muestra, lo que elimina el riesgo de dañarla. Dentro de esta categoría se incluyen diversas técnicas, como la interferometría, la microscopía confocal y la variación de foco.

- Microscopía de Fuerza Atómica (AFM): técnica de alta resolución que utiliza una sonda extremadamente afilada para escanear la superficie a nivel atómico. Proporciona imágenes tridimensionales detalladas y puede medir fuerzas intermoleculares.
- Medición del Ángulo de Contacto (gota sesíl): técnica que consiste en depositar una gota de líquido sobre la superficie y medir el ángulo que forma en el punto de contacto.
- Microscopía Confocal: técnica que utiliza un sistema de láser para escanear la superficie del material y generar imágenes tridimensionales de alta resolución. Es particularmente útil para medir la topografía y la rugosidad de superficies complejas.
- Espectroscopía de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X (XPS): técnica analítica que mide la composición elemental y los estados químicos de los elementos en la superficie de un material (Robinson & Thissen, 2024).



Capítulo 3

Metodología Experimental

En este capítulo se describe el trabajo experimental llevado a cabo a lo largo del trabajo. Se divide en varios subapartados. En primer lugar, se presenta una descripción detallada de los materiales y el adhesivo necesario empleado para la elaboración. Posteriormente se describen las técnicas y equipos utilizados para la realización de las probetas. A continuación, se explicará los tratamientos superficiales que necesarios que se han llevado a cabo. Por último, caracterización de las superficies, donde se describirán los métodos seguidos para determinar las propiedades después de la texturización por granallado con ambos tipos de granalla y sin granallar, y caracterización mecánica de las uniones, donde se describirá el proceso de fabricación de las uniones adhesivas con configuración a simple solape (SLJ) que se ensayarán destructivamente para evaluar su resistencia mecánica a la separación y su modo de fallo, de esta manera comprobamos si el aumento de la energía superficial libre y la rugosidad del sustrato conlleva una mejora de la resistencia mecánica de la unión.

3.1. Materiales

Para realizar los ensayos experimentales contemplados en este trabajo se han empleado diferentes materiales tales como aluminio para el sustrato, granalla de diferentes tipos y adhesivo epóxico bicomponente.

3.1.1. Sustrato

El material seleccionado para este estudio es una aleación de aluminio, elegida por sus excelentes propiedades mecánicas y su versatilidad. Gracias a su capacidad para ser aleado con diversos elementos, el aluminio puede adaptarse a un amplio abanico de aplicaciones industriales. Estas aleaciones responden eficazmente a los tratamientos de endurecimiento, permitiendo obtener materiales con resistencias hasta 30 veces superiores al aluminio puro (Salguero Gómez & Salguero Gómez, 2013). Las distintas aleaciones de aluminio se clasifican en la siguiente tabla:

Serie	Principal aleante	Características
1xxx	Aluminio comercial puro	Elevada resistencia térmica a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica no tratable térmicamente.
2xxx	Cobre	Elevada relación resistencia – peso, baja resistencia a la corrosión, tratable térmicamente.
3xxx	Manganeso	Resistencia moderada, generalmente no tratable térmicamente.
4xxx	Silicio	Bajo punto de fusión, forma una capa de óxido, generalmente no tratable químicamente.
5xxx	Magnesio	Buena solubilidad y resistencia a la corrosión, resistencia moderada, no tratable térmicamente.
6xxx	Magnesio y Silicio	Resistencia media, buena maleabilidad, maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión, tratable térmicamente.
7xxx	Zinc	Resistencia moderada, tratable térmicamente.
8xxx	Otros elementos	-
9xxx	Sin usar	-

Tabla 2. Clasificación de las Aleaciones de Aluminio (Salguero Gómez & Salguero Gómez, 2013).

En dicha designación, el número indica el elemento mayorante de la serie, el segundo indica las posibles modificaciones de la aleación. Por otro lado, el tercer y cuarto dígito no tienen significancia numérica, sino identificativa (Bañón et al., 2019).

Las aleaciones de aluminio son susceptibles de ser sometidas a diferentes tratamientos térmicos con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Con el fin de denominar estos grados de endurecimiento, se hace uso de un sistema de identificación alfa-numérico, las letras empleadas indican los siguientes tipos de tratamiento (Salguero Gómez & Salguero Gómez, 2013):

- F: Condición de fabricación (trabajo en caliente, fundición, forja, etc).
- O: Recocido.
- H: Endurecida por deformación.
- W: Tratada por solución.
- T: Tratada térmicamente.



Aluminio AA2024-T3

Los materiales que se han elegido como sustrato en este estudio es chapa de Aluminio de 3 mm de espesor de la aleación AA2024T3. Se trata de un aluminio caracterizado por su alta resistencia mecánica, excelente resistencia a la fatiga y buena maquinabilidad. Es especialmente adecuada para componentes sometidos a esfuerzos estáticos y dinámicos elevados.

La aleación UNS AA2024-T3 pertenece a la serie 2XXX de aleaciones de aluminio, caracterizada por tener al cobre como principal elemento de aleación, generalmente acompañado por magnesio como aleante secundario. Estas aleaciones se utilizan ampliamente en aplicaciones estructurales donde se requiere alta resistencia mecánica y buena capacidad de mecanizado, aunque presentan baja resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes húmedos o salinos.

La designación 2024 responde al sistema de clasificación de aleaciones de aluminio, que permite identificar la composición y características del material. En primer lugar, el primer dígito "2" indica que pertenece a la serie 2000, donde el cobre actúa como principal elemento de refuerzo, proporcionando una excelente resistencia mecánica y posibilidad de tratamiento térmico. En segundo lugar, el segundo dígito "0" señala que se trata de la aleación original dentro de su serie, sin modificaciones significativas. Y, por último, los dos últimos dígitos "24" no tienen un significado químico específico, sino que se asignan de manera secuencial para identificar las distintas variantes desarrolladas.

La designación T3 hace referencia al tratamiento térmico aplicado a esta aleación. En concreto, implica una solución térmica seguida de un trabajo en frío y posteriormente un envejecimiento natural. Este tratamiento permite mejorar notablemente sus propiedades mecánicas, optimizando su resistencia a la tracción, al cizallamiento y a la fatiga, lo que la convierte en un material idóneo para aplicaciones aeroespaciales y de ingeniería estructural exigente (Bañon et al., 2019). A continuación, se presenta una descripción más detallada de sus características:



Composición Química	<ul style="list-style-type: none">- Cobre (Cu): 3,80 - 4,90 %- Magnesio (Mg): 1,20 - 1,80 %- Manganeso (Mn): 0,30 - 0,90 %- Silicio (Si): 0,50 % máximo- Hierro (Fe): 0,50 % máximo- Zinc (Zn): 0,25% máximo- Cromo (Cr): 0,10 % máximo- Titanio (Ti): 0,15 % máximo- Aluminio (Al): Resto (balance)
Propiedades Mecánicas	<ul style="list-style-type: none">- Resistencia a la tracción: 470 MPa- Límite elástico: 324 MPa- Alargamiento a la rotura: 20 %- Resistencia al corte: 283 MPa- Resistencia a la fatiga: 138 MPa
Propiedades Físicas	<ul style="list-style-type: none">- Densidad: 2,78 g/cm³- Punto de fusión: 502 °C- Módulo de elasticidad: 73,10 GPa- Conductividad térmica: 121 W/m · K
Tratamiento Térmico	<ul style="list-style-type: none">- Temple: Calentamiento para disolver los elementos de aleación en una solución sólida.- Enfriamiento rápido: En agua para retener la solución sólida.- Trabajo en frío: Deformación plástica para aumentar la resistencia.- Envejecimiento natural: A temperatura ambiente para que los precipitados mejoren la resistencia.

Tabla 3. Composición de la aleación UNS A92024-T3 (M. Geraldine Bogotá, n.d.; Salguero Gómez & Salguero Gómez, 2013; U. 38314, n.d.).



3.1.2. Adhesivo

El adhesivo utilizado en este estudio es una resina epoxi de endurecimiento rápido para metal, del fabricante MA Professional, específicamente el modelo KTM 20-A43 como se muestra en la figura 14. Se trata de un adhesivo bicomponente presentado en formato de jeringa doble, lo que facilita la mezcla precisa de los dos componentes justo antes de su aplicación. Este tipo de adhesivos pertenece a la familia de los adhesivos reactivos estructurales, conocidos por su capacidad para formar uniones de elevada resistencia y rigidez.

Ha sido diseñado específicamente para uniones en aleaciones metálicas, aunque su versatilidad permite su aplicación en materiales como madera, cerámica, plásticos y otros sustratos comunes en ingeniería. Es muy utilizado en contextos industriales y de mantenimiento, particularmente en el sector automotriz y metalmecánico, donde se requiere un pegado fuerte y duradero capaz de soportar condiciones adversas.

En el caso de este proyecto, su elección responde a la necesidad de obtener una unión fiable y de altas prestaciones entre componentes metálicos.

El adhesivo presenta un proceso de curado rápido. Una vez realizada la mezcla homogénea de los dos componentes, comienza una primera fase de curado con una vida útil aproximada de 4 a 10 minutos. Durante este tiempo, el adhesivo permanece manipulable y puede aplicarse correctamente sobre las superficies a unir. Es importante realizar este proceso sin demoras, ya que pasado ese umbral el adhesivo comienza a endurecerse rápidamente. A los 60 minutos de su aplicación, el adhesivo alcanza aproximadamente un 80 % de su curado total, desarrollando ya una buena resistencia mecánica, aunque todavía no definitiva. Para asegurar el rendimiento completo de la unión, se debe respetar el tiempo de curado final de 24 horas, tras el cual el material alcanza sus propiedades mecánicas y térmicas óptimas, incluyendo una elevada resistencia a tracción y al corte, así como estabilidad térmica hasta 150 °C.

Para finalizar, cabe destacar que este adhesivo presenta una resistencia a tracción entre 20 y 35 MPa, dependiendo del tipo de sustrato, preparación superficial y condiciones de curado, y resistencia a la cizalladura entre 10 y 25 MPa.



Figura 14. Adhesivo MA Profesional KTM 20-A43 (MA Professional Klej Epoksydowy Do Metalu 5 Minut - Strzykawką, n.d.).

A continuación, se presenta una descripción más detallada:

<p>Denominación</p>	<p>MA profesional KTM 20-A43.</p> <p>Adhesivo epoxi para metal 5 minutos – jeringa</p>
<p>Propiedades físicas y químicas básicas</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Estado de la materia: Líquido. - Color: Amarillo - Punto de inflamación: 93,4°C - Solubilidad en agua: Casi insoluble

Tabla 4. Características del adhesivo empleado (MA Professional Klej Epoksydowy Do Metalu 5 Minut - Strzykawką, n.d.).



3.1.3. Granalla

Para este trabajo se han usado dos tipos de granalla, corindón y microesferas de vidrio. A continuación, se detallan las características principales de cada uno de ellos.

Corindón o80

El corindón o80 (figura 15) es un abrasivo industrial compuesto principalmente por óxido de aluminio (Al_2O_3), con una pureza superior al 95%. Se caracteriza por su elevada dureza, solo por debajo del diamante. Esta propiedad lo convierte en un material ideal para procesos industriales que requieren una acción abrasiva intensa y precisa.

Entre sus aplicaciones más habituales se encuentran el granallado y arenado de superficies. También se emplea en trabajos de microacabado de piezas mecánicas y en corte mediante chorro abrasivo, ya que permite trabajar materiales duros sin causar deformación térmica.

Su forma angular y su capacidad de corte proporcionan un acabado uniforme y rugoso, mejorando la adherencia de recubrimientos posteriores. En comparación con otros abrasivos, el corindón presenta ventajas significativas. Frente a la arena de sílice, es más duro, no libera sílice libre, y ofrece mayor durabilidad y reutilización. Comparado con las microesferas de vidrio, proporciona un acabado más agresivo, y en relación al carburo de silicio, aunque este es más duro, el corindón es menos frágil, más asequible y adecuado para una gama más amplia de aplicaciones generales.

El precio del corindón o80 varía entre 1,5 y 2,5 €/kg, dependiendo del proveedor, la granulometría y el volumen de compra. A pesar de tener un coste inicial algo más elevado que otros abrasivos convencionales, su durabilidad y capacidad de reutilización (de 3 a 10 ciclos, según las condiciones de uso) lo convierten en una opción rentable.

Este material se obtiene a partir de la bauxita, mineral rico en aluminio, mediante un proceso de fusión a alta temperatura que permite la producción de alúmina fundida. Posteriormente, esta se tritura y clasifica según el tamaño de partícula deseado.

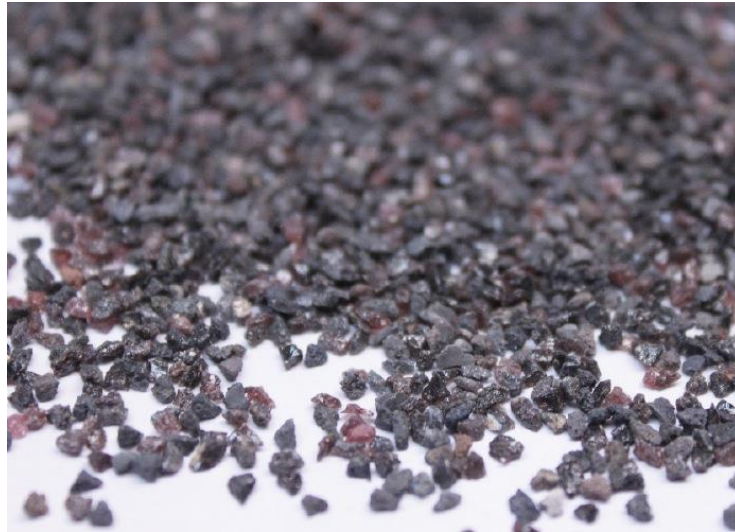


Figura 15. Corindón o80 (Aguila Noroeste S.L, n.d.).

A continuación, se presenta una descripción más detallada de sus características:

Composición	<ul style="list-style-type: none"> - Al_2O_3: 95,20 % - TiO_2: 2,45 % - Fe_2O_3: 0,15 % - SiO_2: 1,20 % - CaO: 0,30 %
Tamaño de Partícula	180 – 250 μm .
Dureza	En torno a 9 en la escala de Mohs.
Forma	La forma de las partículas es angular.

Tabla 5. Características de las partículas de corindón empleadas (CORINDON MARRON o80 (25Kg) CORINDON MARRON o80 (SACOS 25Kg), n.d.).

Esferas de vidrio 1216 CP-00

Las esferas de vidrio 1216 CP-00 (figura 16) son un abrasivo industrial fabricado a partir de vidrio sódico-cálcico tratado térmicamente. Se presentan en forma esférica y tienen una dureza moderada.

Esta característica, junto con su estructura no angular, las hace especialmente útiles en procesos donde se requiere limpieza sin pérdida de material base ni generación de rugosidad agresiva.

Entre sus aplicaciones más habituales se encuentran el granallado suave, limpieza de superficies delicadas, eliminación de óxidos ligeros, preparación previa a recubrimientos, y acabado estético de piezas metálicas.

A diferencia de abrasivos angulares como el corindón, las esferas de vidrio generan un acabado satinado y uniforme, sin remover material del sustrato, lo cual es especialmente valioso cuando se trabaja con componentes de precisión o materiales blandos. Frente a la arena de sílice, no contienen sílice libre, lo que mejora notablemente las condiciones de seguridad en el trabajo. Comparadas con el corindón, su acción es menos agresiva, pero son más apropiadas para tareas que requieren un acabado fino. Frente al granallado metálico, son más ligeras, no generan chispas y son químicamente inertes, evitando contaminaciones metálicas en las superficies tratadas.

El precio de las esferas de vidrio 1216 CP-00 suele oscilar entre 1,8 y 3 €/kg, dependiendo de la granulometría y el volumen de compra. Aunque su coste puede parecer elevado frente a abrasivos de uso único, su alta reutilización, entre 10 y 30 veces, las convierte en una opción muy rentable en procesos automatizados o de alta precisión.

Estas esferas se obtienen a partir de vidrio reciclado o virgen, fundido y atomizado para formar microsferas homogéneas, que luego se clasifican por tamaño.



Figura 16. Esferas de Vidrio 1216 CP-00 (Bola de Vidrio (Microesferas de Vidrio) Para Procesos de Chorreado-AYMSA, n.d.).

A continuación, se presenta una descripción más detallada de sus características:

Composición	<ul style="list-style-type: none"> - SiO_2: 70,00 – 75,00 % - Na_2O: 13,00 – 15,00 % - K_2O: 1,50 % máximo - CaO: 7,00 – 12,00 % - MgO: 5,00 % máximo - Fe_2O_3: 0,50 % máximo - Al_2O_3: 2,50 % máximo - SO_3: 0,50 % máximo
Tamaño de Partícula	100 μm
Dureza	En torno a 6 en la escala de Mohs.
Forma	La forma de las partículas es esférica.

Tabla 6. Características de las partículas de vidrio empleadas (Bola de Vidrio (Microesferas de Vidrio) Para Procesos de Chorreado-AYMSA, n.d.).

3.2. Fabricación de las probetas

La fabricación de las probetas se han llevado a cabo según la norma UNE EN-ISO 1465:2009, que regula el ensayo de probetas mediante cizallamiento por tracción de uniones solapadas. Según esta norma, la geometría que deben de tener las probetas son las mostradas en la figura 17.

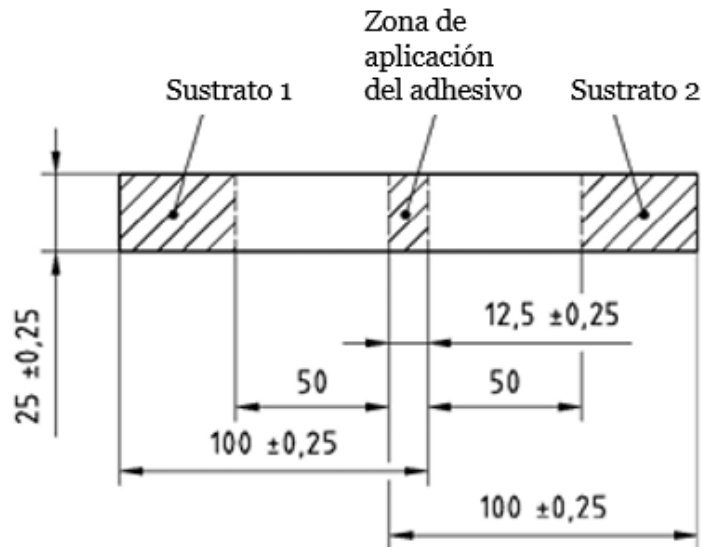


Figura 17. Vista en planta del esquema de medidas reguladas que deben tener las probetas según la norma (UNE-EN 1465, 2009).

3.2.1. Corte

Se parte de una chapa de aluminio AA2024-T3 de 1000 x 1000 mm, por lo que necesita previamente un proceso de corte para elaborar las probetas. Para la elaboración de dicho corte, en el que no se han realizado una preparación previa de la superficie, se han utilizado una cizalla automática. El procedimiento se realiza corte individual de 100 x 25 mm como se observa en la figura 18.

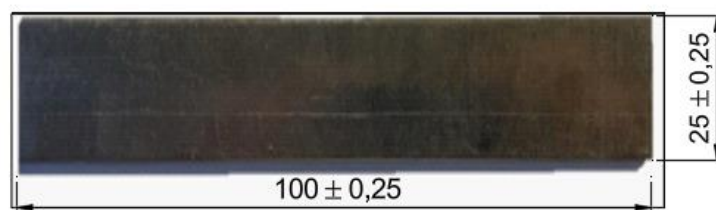


Figura 18. Esquema de medidas de un sustrato cortado.

3.2.2. Tratamiento superficial

Una vez realizado el corte individualizado algunas de las probetas se han sometido a un tratamiento superficial mediante granallado. Para ello, han sido necesario preparar las probetas antes de iniciar el proceso. Primero, se separan, marcan y limpian las probetas según las partículas con las que serán granalladas, y se protegen las zonas que no deben ser impactadas por la granalla.

De acuerdo con la norma UNE EN-ISO 1465:2009 la zona en la que se aplica el adhesivo corresponde a $12,50 \pm 0,25$ mm de un extremo de la probeta como se puede observar en la figura 19. Por esta razón, se han protegido la zona contigua al área tratada, evitando que pueda ser dañada por la granalla. El material usado para este fin ha sido cinta de carroceros TESA 4317. Esta cinta se elimina tras el tratamiento superficial.



Figura 19. Esquema de medidas del extremo a tratar y zona protegida por cinta de carroceros TESA 4317.

Una vez todos los sustratos están separados, marcados y protegidos se pasará al tratamiento superficial en una máquina de chorreo de arena también llamada granalladora, como se observa en la figura 20a. Funciona proyectando granalla a alta velocidad sobre la superficie del sustrato. Está compuesta por un depósito de almacenaje de partículas, un sistema de alta presión que se encargará de administrar la presión que necesaria, una pistola por donde proyectará la granalla, vidriera para poder ver el interior, guantes de protección, sistema eléctrico y la propia estructura que es la encargada de dar soporte a todo, todas las partes anteriores se pueden observar en la figura 20. Esta máquina es de fabricación casera y pertenece al taller de fabricación de la Escuela de Ingenierías Industriales.

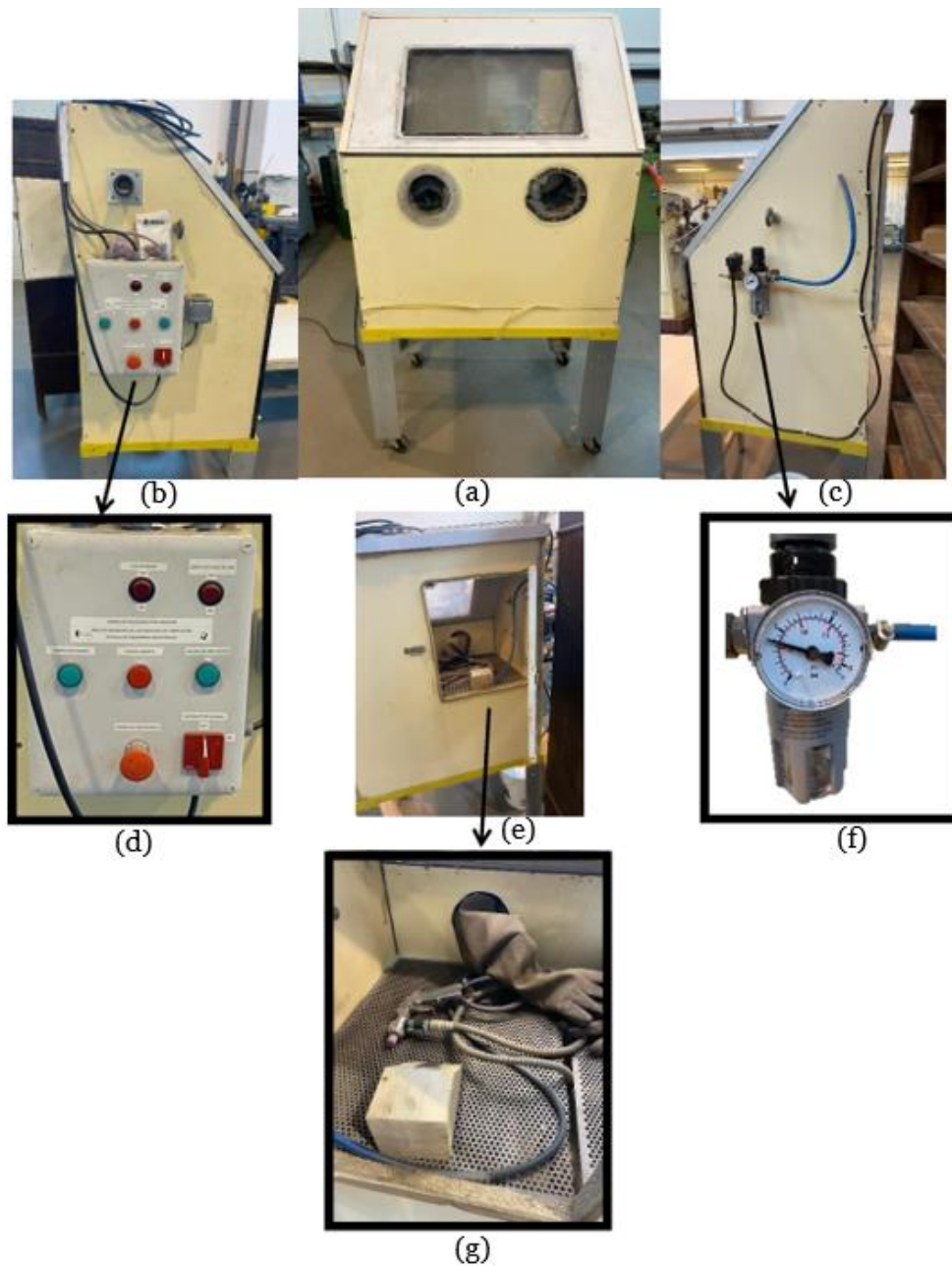


Figura 20. (a) Imagen general de la granalladora. (b) Imagen del perfil derecho de la granalladora. (c) Imagen del perfil izquierdo de la granalladora. (d) Panel eléctrico de la granalladora. (e) Imagen de la parte trasera de la granalladora. (f) Regulador de presión con manómetro. (g) Interior de la granalladora.

Para proceder se debe cargar la máquina con las partículas que se van a utilizar para granallar. Este proceso se realiza cerrando el tapón situado en la parte inferior de la granalladora e introduciendo la granalla correspondiente dentro de la cabina. En nuestro caso, utilizaremos dos tipos de partículas diferentes: corindón y micropartículas esféricas de vidrio. Esto tiene como objetivo proporcionar diferentes acabados manteniendo algunos parámetros de granallados idénticos. A continuación, se presenta una descripción más detallada de los parámetros de granallado:

Parámetro	Valor / Descripción
Presión de salida	2, 3, 4 y 5 bar
Diámetro de boquilla	5,00 mm
Distancia boquilla-sustrato	$\pm 200,00 \text{ mm}$
Ángulo de impacto granalla-sustrato	45 °

Tabla 7. Parámetros de granallado.

Una vez que el equipo ha sido preparado con los parámetros establecidos, se procede a la realización del granallado. El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Primero, se debe conectar la granalladora a dos fuentes: el sistema de presión exterior, que proporciona el aire comprimido necesario para el granallado, y la corriente eléctrica general, que activa el funcionamiento del equipo.
2. Una vez realizadas todas las conexiones necesarias, se procede a introducir en la cabina de granallado, a través de la puerta trasera, un soporte previamente preparado, el cual presenta una inclinación de 45° en una de sus caras con el fin de facilitar la proyección de la granalla en ángulo adecuado, así como las probetas que se someterán al tratamiento. La Figura 21a muestra la disposición exacta de estos elementos en el interior de la cabina.
3. Una vez dentro las probetas, se cierra la puerta de la cabina asegurándose de que quede bien cerrada utilizando el pestillo de seguridad. Esto es importante para evitar que el material de granallado se escape durante el proceso.
4. A continuación, se debe encender la granalladora utilizando su interruptor. Este interruptor se encuentra en el panel de control de la máquina, como se observa en la figura 21b.

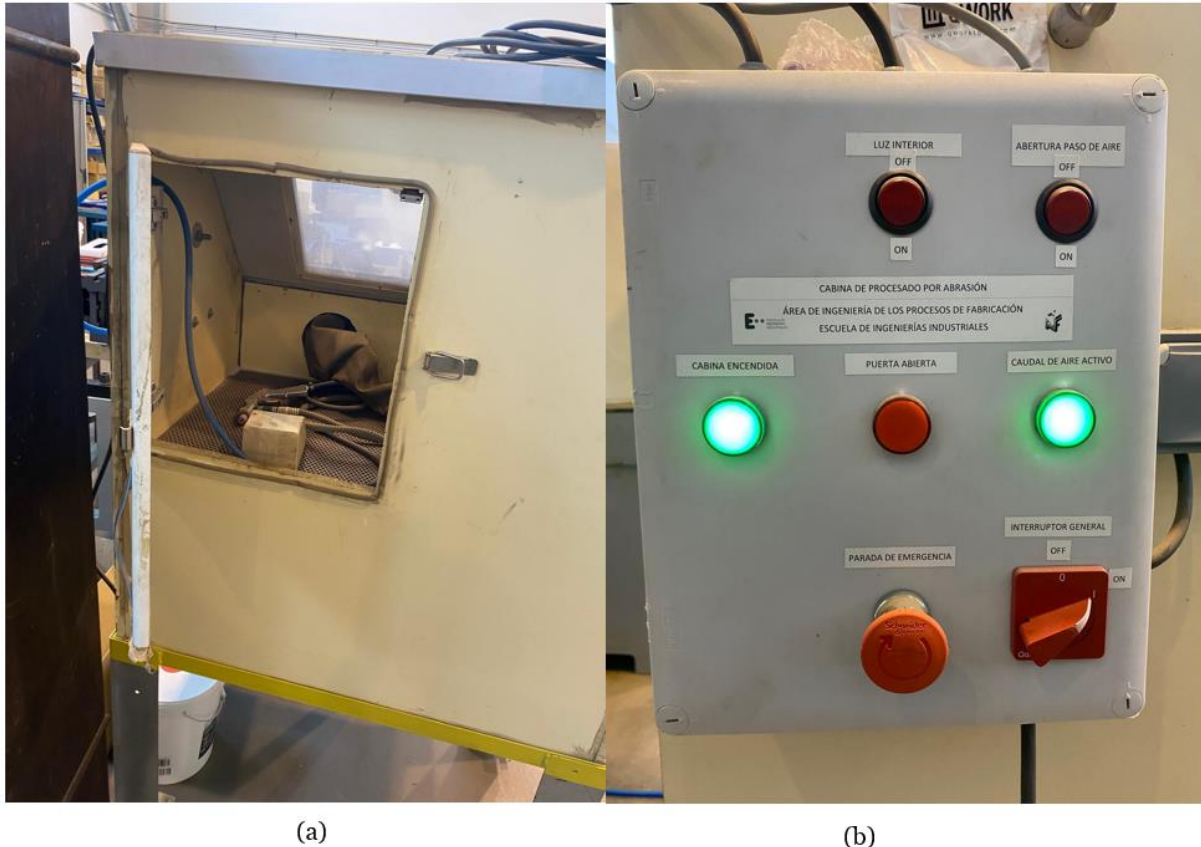


Figura 21. (a) Hueco para introducir probetas con puerta y pestillo de seguridad ubicado en la parte trasera. (b) Panel eléctrico.

5. A través del regulador de presión, se ajusta la presión requerida para el proceso de granallado. Este regulador de presión está conectado a un manómetro que indica la presión exacta que se está aplicando. La presión es gestionada por una electroválvula que se abre o se cierra automáticamente según la demanda, lo que permite controlar la cantidad de aire hacia la pistola de chorreado. En la figura 22a se puede ver este regulador y el sistema de distribución de aire.
6. Antes de comenzar, es necesario encender la luz de la cabina para garantizar que el área de trabajo esté bien iluminada. Este control se encuentra en el cuadro eléctrico de la máquina, visible en la figura 21b.
7. Para asegurar la seguridad personal durante el proceso de granallado, se deben introducir los brazos en los guantes de protección, los cuales están ubicados en la parte frontal de la cabina de la granalladora. La figura 22b muestra ubicación.
8. A continuación, se debe tomar la pistola de granallado. Es fundamental establecer la distancia correcta entre la pistola y la probeta a tratar, así como la dirección en la que se aplicará el chorro de granalla, para asegurar que el proceso sea efectivo y controlado.
9. Finalmente, se procede a activar la pistola y se comienza el proceso de granallado. Durante este paso, la granalla es disparada a alta velocidad hacia la superficie de las probetas, lo que modifica su textura y rugosidad.

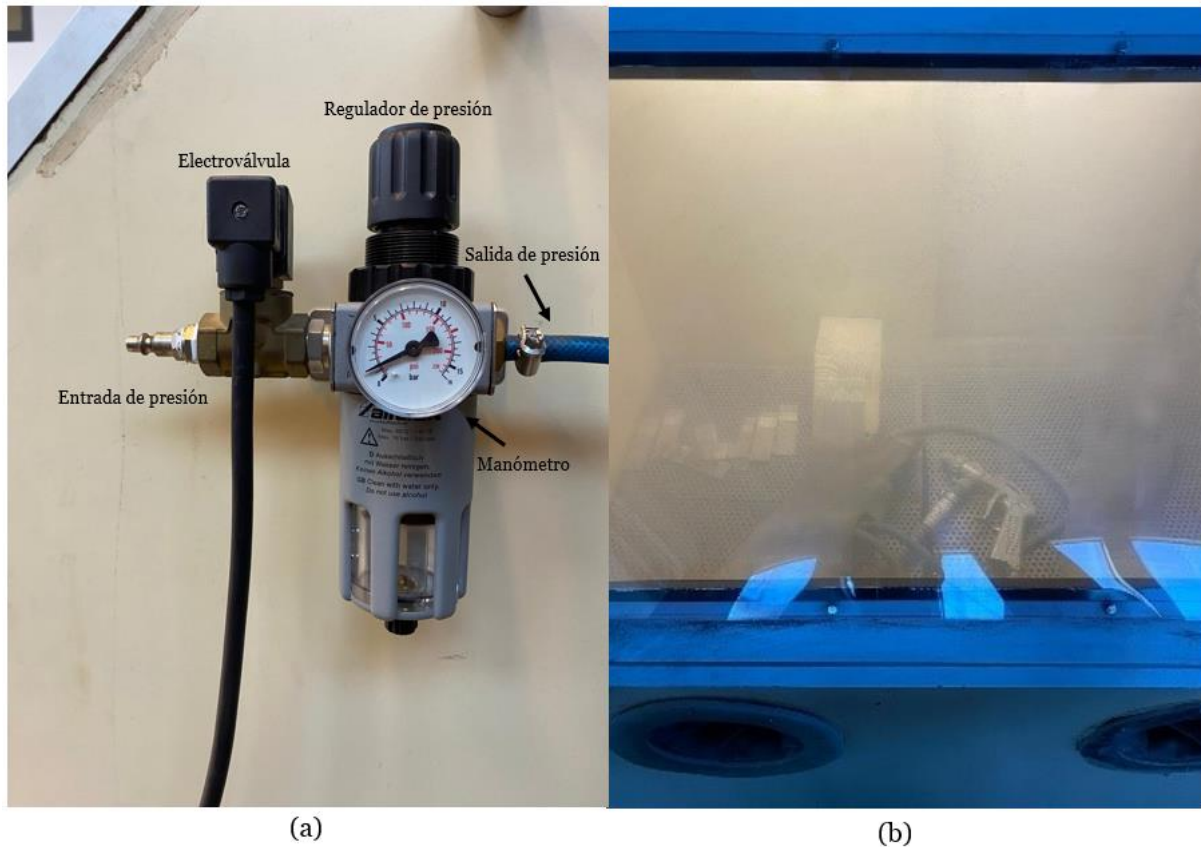


Figura 22. (a) Elemento del regulador de presión de la máquina de granallado. (b) Visión interior de la granalladora desde el exterior por el vidrio protector.

3.2.3. Pegado

Una vez realizado el corte y los tratamientos superficiales, se procede al pegado de ambos sustratos según el siguiente procedimiento:

1. Limpieza y secado de la superficie. Se opta por una limpieza de forma manual e individual utilizando una bayeta y el Limpiador desinfectante, bactericida y fungicida Bionet® Plus. Figura 23.



Figura 23. Producto utilizado para la limpieza de las superficies previas al pegado: Fumicida Bionet® Plus.

2. Con el objetivo de asegurar la linealidad y evitar desplazamientos o desalineaciones durante los posteriores ensayos de tracción, se han adherido suplementos en los extremos de cada probeta, como se observa en la figura 24. Para ello, se han recortado pequeñas piezas del mismo material base, que posteriormente se han colocado y fijado en ambos extremos, garantizando así una correcta transmisión del esfuerzo axial y una distribución uniforme de la carga durante el ensayo.



Figura 24. Vista del perfil de los suplementos añadidos.

3. Es necesario contar con una estructura que garantice la reproducibilidad de las probetas durante el proceso, asegurando que ambos sustratos se mantengan alineados y cumplan con las medidas establecidas en la norma, se puede observar el útil en la figura 25. Dado que las uniones son solapadas, uno de los sustratos está dispuesto elevado con respecto a la base de referencia, en una altura igual al espesor del otro sustrato. Además, como ambos sustratos tienen el mismo espesor, se han utilizado un utensilio fabricado del mismo material como soporte para nivelar las alturas y mantener la alineación, se puede observar el útil en la figura 26.

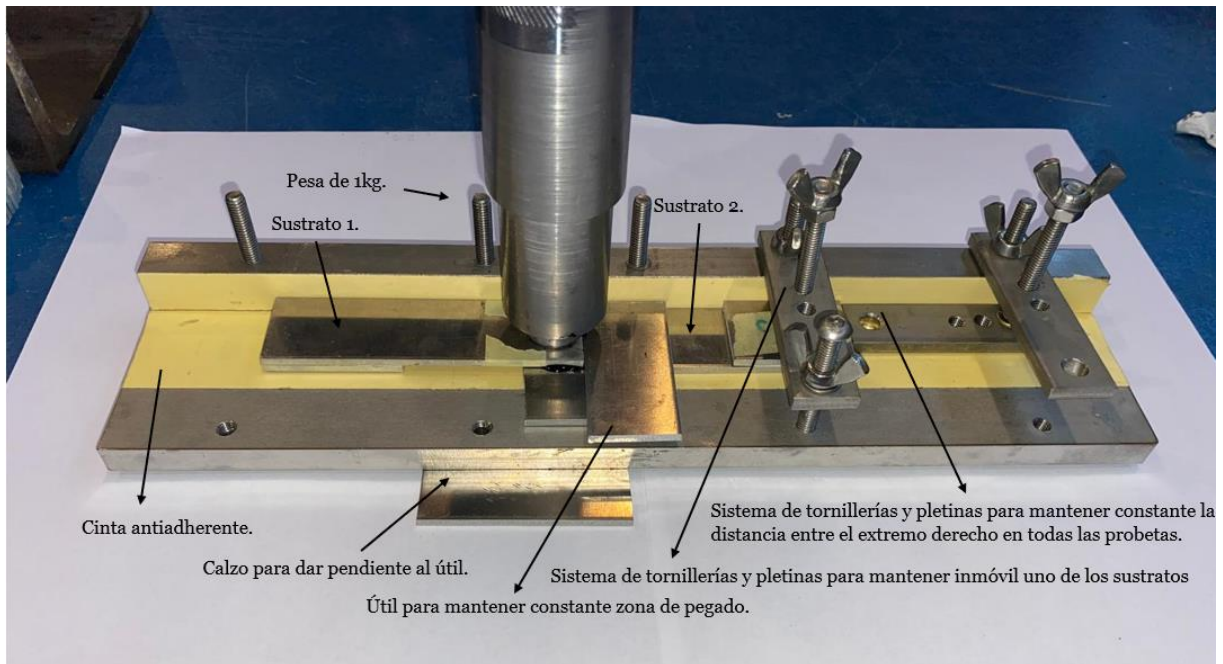


Figura 25. Útil utilizado para mantener la reproducibilidad en el ensayo.

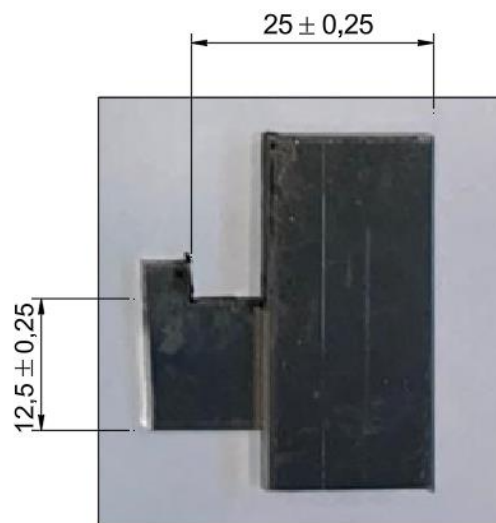


Figura 26. Útil utilizado para la altura y las medidas de la zona de pegado.

4. Retirar la protección de los aplicadores y exprimir la misma cantidad de masa de cada tubo como se observa en la figura 27a y 27b, y mezclar bien hasta obtener un color negro uniforme, como se observa en la figura 28.

Durante esta fase, se presentaron diversas incidencias relacionadas con el comportamiento del adhesivo, las cuales afectaron tanto la homogeneidad del material como la repetitividad del procedimiento de pegado. En primer lugar, se realizaron unas pruebas iniciales para determinar el método de aplicación y marcado. En este primer ensayo, el adhesivo se encontraba a temperatura ambiente. Al extraer el componente transparente del sistema bicomponente, se observó la aparición inesperada de un líquido blanco, cuya naturaleza no se

pudo identificar con certeza. No obstante, tras realizar la mezcla con el otro componente, se obtuvo una pasta de color negro uniforme, aparentemente correcta para la aplicación.

Con el fin de preservar el adhesivo para días posteriores y evitar posibles alteraciones por exposición ambiental, es almacenado en un frigorífico. Sin embargo, esta acción introdujo un nuevo problema: en el segundo día de trabajo, al extraer el adhesivo refrigerado para continuar con los primeros ensayos útiles, se detectó un aumento significativo en la viscosidad del producto. El adhesivo presentaba una resistencia considerable al salir por los orificios de la jeringa, dificultando su dosificación y aplicación. Además, al realizar la mezcla, el color resultante no fue el negro uniforme habitual, sino un tono grisáceo, lo que indicaba una posible alteración en la proporción, homogeneidad o reactividad de los componentes debido al cambio térmico. Esta alteración cromática no solo generaba dudas sobre la eficacia del curado, sino que también podía influir en las propiedades mecánicas finales del adhesivo.

Ante esta situación, se volvieron a repetir todas las probetas anteriormente pegadas y se optó por no volver a refrigerar el adhesivo y mantenerlo siempre a temperatura ambiente.

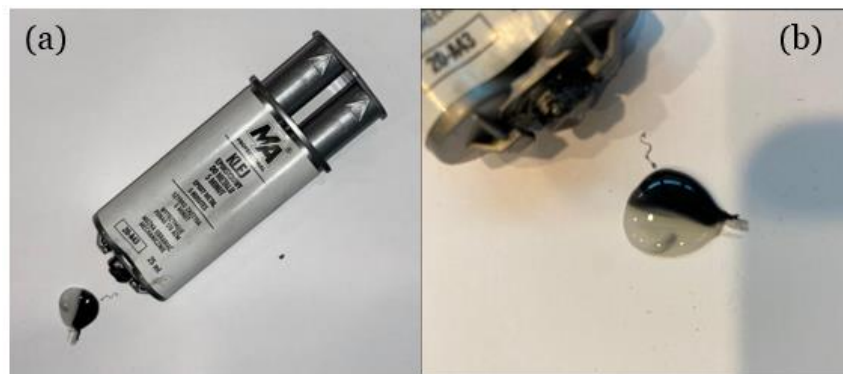


Figura 27. (a) Dispositivo de aplicación del adhesivo bicomponente. (b) Ejemplo de cantidad de mezcla de adhesivo empleada para el pegado de cada probeta.



Figura 28. Espátula y mezcla realizada para proceder con el pegado.

- Una vez realizada la mezcla del adhesivo epoxi bicomponente, se han de aplicar manualmente sobre las superficies a unir utilizando una espátula. La mezcla se han de agitar de forma continua durante 1 minuto, asegurando una integración homogénea de ambos componentes. El adhesivo se aplicará de manera uniforme sobre toda la superficie de contacto de cada probeta, formando una capa fina y continua, como se observa en la figura 29. La cantidad aplicada será suficiente para que, al unir ambas superficies, el exceso de adhesivo sobresaliera ligeramente por los bordes, garantizando así un contacto completo entre ambas caras adheridas y evitando zonas secas o mal adheridas.

Durante cada sesión de trabajo, y por cada mezcla individual de adhesivo, se procederá a pegar un total de tres probetas de forma consecutiva. Estas tres probetas corresponderán a una misma combinación de condiciones experimentales, con el objetivo de mantener la homogeneidad en el proceso de adhesión y asegurar la validez comparativa entre los ensayos.

Se procurará siempre respetar las recomendaciones del fabricante de no superar los 10 minutos entre la mezcla del adhesivo y la aplicación sobre las probetas, de forma que no se inicie el proceso de curado antes del ensamblado. En todo momento, las condiciones ambientales se mantendrán constantes para evitar la influencia de variables externas en la viscosidad del adhesivo o en el tiempo de trabajo útil.



Figura 29. Adhesivo aplicado en la superficie marcada para pegar.

- Una vez aplicadas las capas de adhesivo, se deben ensamblar los sustratos en la estructura de apoyo previamente descrita. En primer lugar, es fundamental comprobar que todos los componentes del útil se encuentren correctamente montados, con la tornillería bien ajustada y las chapas situadas en su posición correspondiente. A continuación, se introduce el primer

sustrato en su alojamiento, tal y como se muestra en la figura 30, y se fija mediante los tornillos asignados. Seguidamente, se coloca el útil diseñado para mantener las alturas constantes durante el proceso de curado. Posteriormente, se posiciona el segundo sustrato, ya con el adhesivo aplicado, asegurándose de que quede alineado correctamente, según indica la figura 31. Finalmente, se coloca una pesa de un kilogramo sobre la superficie del segundo sustrato, en la zona donde se han realizado la unión adhesiva, para asegurar un contacto uniforme durante el curado, y se retira el útil de pegado como se muestra en la figura 32.

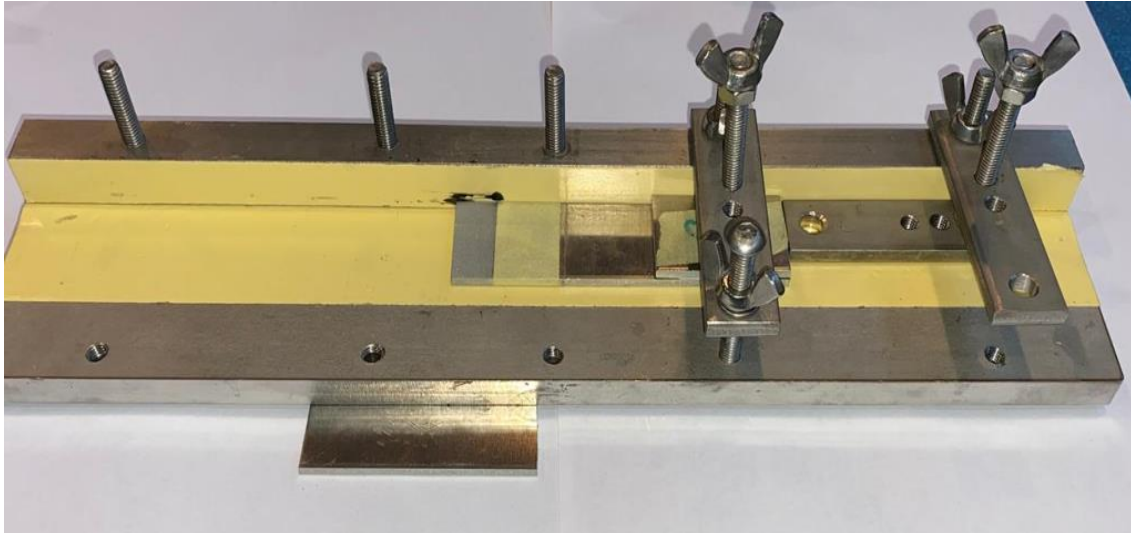


Figura 30. Fijación del primer sustrato en el útil de alineamiento.

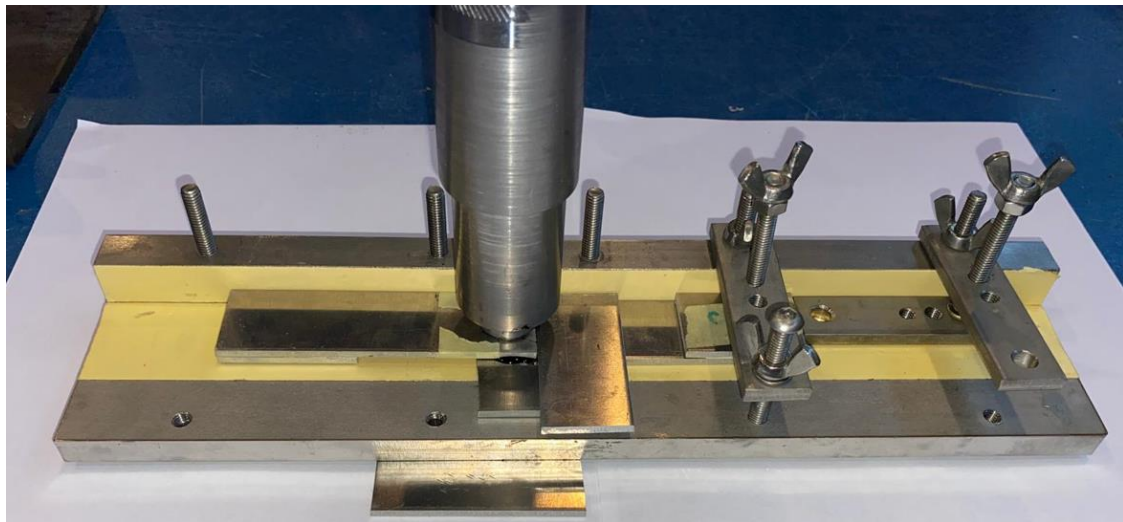


Figura 31. Probetas en posición para ser pegadas, útil de pegado y pesa de 1 kg para mantener reproducibilidad.

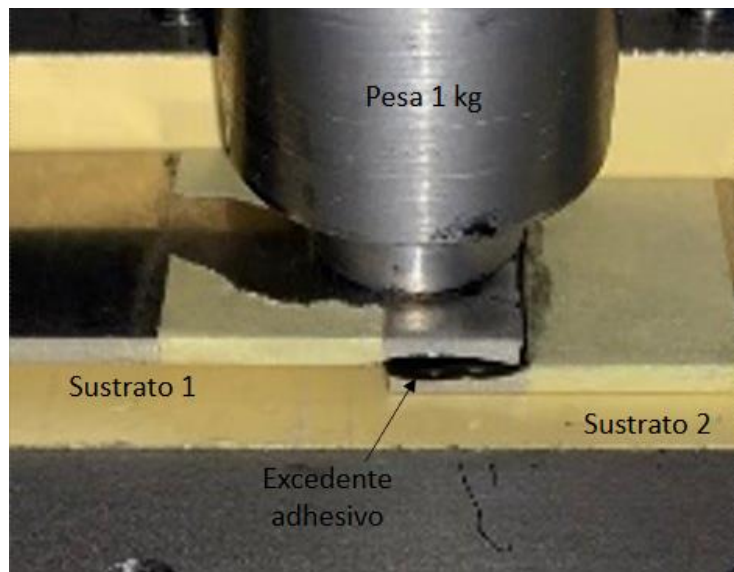


Figura 32. Probetas en posición para ser pegadas y pesa de 1 kg para mantener reproducibilidad tras 5 min.

7. Retirar el exceso de pegamento con una toalla o un paño humedecido en disolvente.
8. Dado que tras una hora cuando retiramos la pesa de 1 kg solo se alcanza aproximadamente el 80 % del curado, es fundamental garantizar condiciones adecuadas para que el proceso de endurecimiento continúe correctamente. Por ello, las probetas deben conservarse en un entorno que mantenga una temperatura ambiente estable durante al menos 24 horas, lo cual permite que el adhesivo complete su curado al 100 %, tal y como establece el fabricante (figura 33).

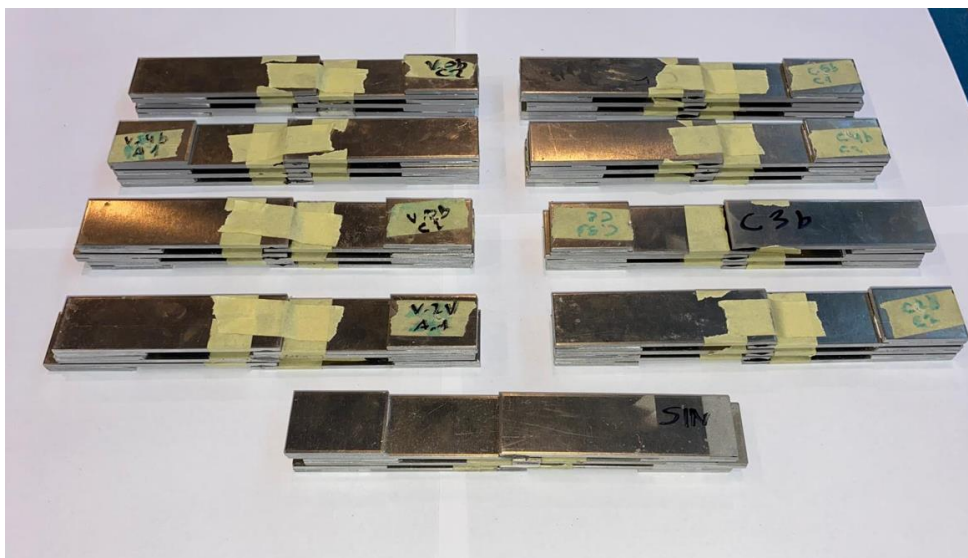


Figura 33. Probetas pegadas.

9. Retirar la cinta de carroceros que se han colocado y limpiar la superficie en caso de quedar algún residuo, como se muestra en la figura 34.

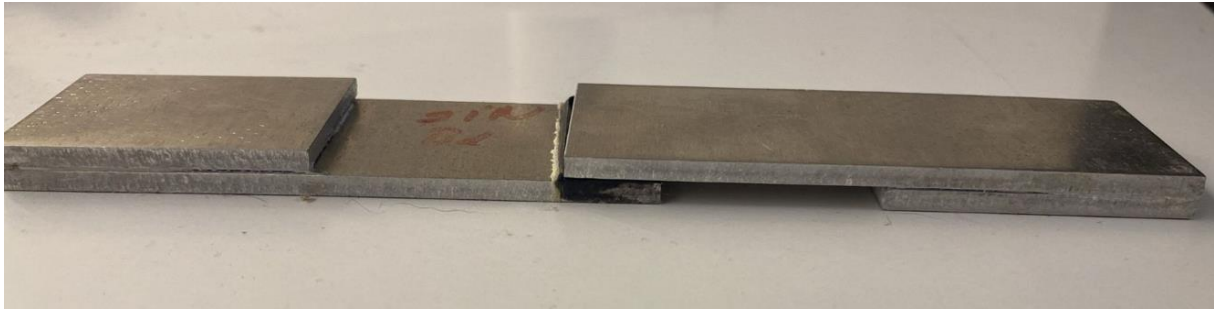


Figura 34. Probeta lista para ensayo a tracción.

3.3. Caracterización superficial de las probetas.

Una vez realizado el granallado el objetivo es determinar el texturizado y la mojabilidad que se han conseguido para ambos tipos de partículas.

3.3.1. Rugosidad

Para el análisis de las superficies texturizadas se han de emplear el equipo de medición óptica 3D InfiniteFocus SL de la empresa Alicona®, un sistema avanzado diseñado para caracterizar con alta precisión tanto la geometría como la rugosidad superficial como se observa en la figura 35. Su principio de funcionamiento se basa en la tecnología de variación de enfoque, la cual combina la reducida profundidad de campo de un sistema óptico con un escaneo vertical automatizado del eje Z. Esta técnica permite generar modelos tridimensionales detallados de las superficies, ofreciendo simultáneamente información topográfica y cromática, lo que lo hace especialmente útil para la inspección de superficies microestructuradas o tratadas.

El equipo proporciona una resolución lateral de hasta 400 nanómetros y una resolución vertical de hasta 10 nanómetros, permitiendo detectar con gran precisión irregularidades mínimas. Además, cuenta con una capacidad de medición máxima de 50 mm x 50 mm.

Para adaptarse a las distintas exigencias del análisis, el InfiniteFocus SL permite el uso de objetivos intercambiables con aumentos de 5x, 10x, 20x y 50x, con distancias de trabajo comprendidas entre 10,1 mm y 17,5 mm.

El sistema no solo permite la medición de parámetros dimensionales, sino también el análisis detallado de rugosidad superficial, cumpliendo con normas internacionales como la ISO 4288. Asimismo, ofrece capacidades de análisis de forma, perfil, volumen y área, todo ello integrado en un software avanzado que también permite la clasificación automática de superficies, identificando áreas conformes y no conformes, lo que facilita el control de calidad en procesos repetitivos.

Finalmente, el InfiniteFocus SL destaca por su capacidad de automatización, permitiendo la realización de mediciones en serie sin necesidad de intervención manual. Su sistema de iluminación LED en anillo garantiza una iluminación uniforme en todo tipo de superficies, asegurando la calidad de las imágenes adquiridas.



Figura 35. Equipo 3D Infinite Focus SL de la empresa Alicona®.

Para la obtención de los datos, se seleccionó un área representativa de 2 mm x 2 mm, lo que permite cuantificar de manera precisa la calidad de la superficie texturizada. Esta área fue elegida debido a su capacidad para proporcionar una muestra representativa de la rugosidad superficial, permitiendo un análisis detallado y fiable de los parámetros relevantes.

El procedimiento seguido para la toma de datos fue el siguiente:

1. En primer lugar, se procedió a encender la máquina de medición, lo que activó automáticamente el proceso de calibración del equipo. La calibración automática es esencial para asegurar que todos los parámetros del sistema estén ajustados correctamente antes de iniciar las mediciones, garantizando así la precisión de los datos obtenidos.
2. A continuación, se procedió a colocar la probeta sobre la base calibrada del sistema. Es importante que la probeta se encuentre alineada adecuadamente con la óptica del equipo, lo que garantiza que la superficie de la probeta se observe correctamente durante el proceso de medición. Para ello, se utilizó un bloque patrón adicional que redujo la distancia entre la lente y la probeta, optimizando el enfoque.

3. Para facilitar la alineación de la probeta con la lente del sistema, se activó el puntero láser, el cual sirve como una referencia visual para indicar la zona exacta que se está enfocando.
4. Una vez alineada correctamente la probeta, se procedió al ajuste del enfoque y de los parámetros ópticos del sistema mediante el software del equipo. Este ajuste incluyó la optimización de parámetros como el brillo y la altura, con el fin de garantizar que las mediciones de rugosidad se realizaran con la máxima precisión posible.
5. Completado el ajuste de los parámetros ópticos, se inició el proceso de medición. El software del equipo comenzó a recopilar datos sobre diversas características de la superficie de la probeta, tales como la rugosidad media, la rugosidad cuadrática media, entre otros parámetros relevantes.
6. Una vez obtenidos los datos de la medición, estos fueron almacenados en el sistema para su posterior análisis. El proceso de medición se repitió para cada una de las probetas analizadas, con el fin de obtener un conjunto representativo de datos de diferentes superficies tratadas bajo las mismas condiciones de granallado.

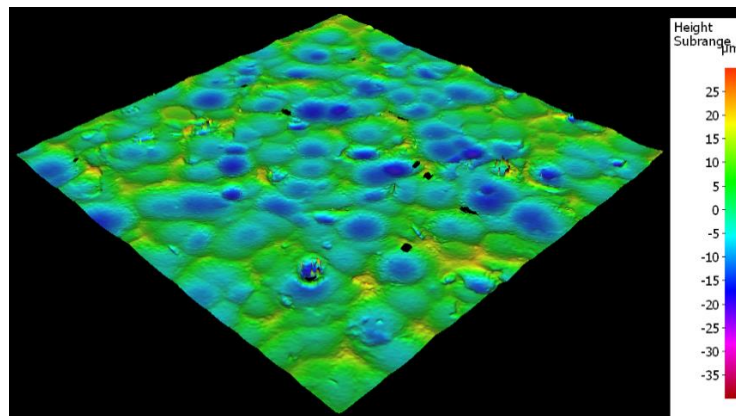


Figura 36. Representación 3D usando el equipo Alicona® de una superficie de aluminio tratada mediante granallado de vidrio.

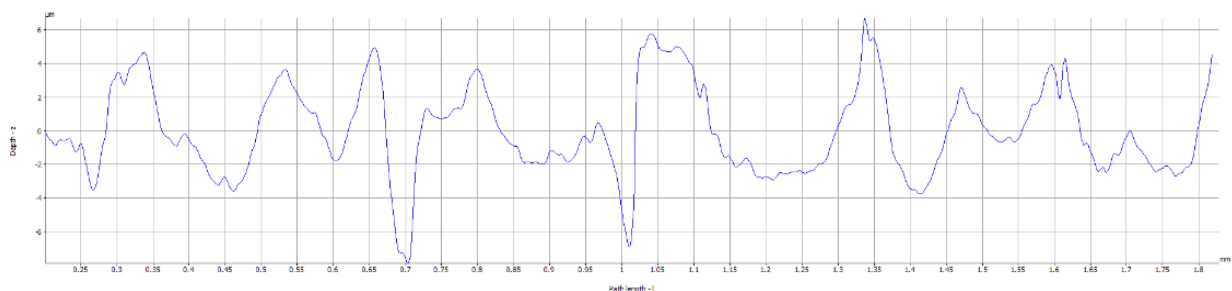


Figura 37. Representación gráfica del perfil de la superficie tratada con vidrio a lo largo de 1,8 milímetros mediante aparato Alicona®.

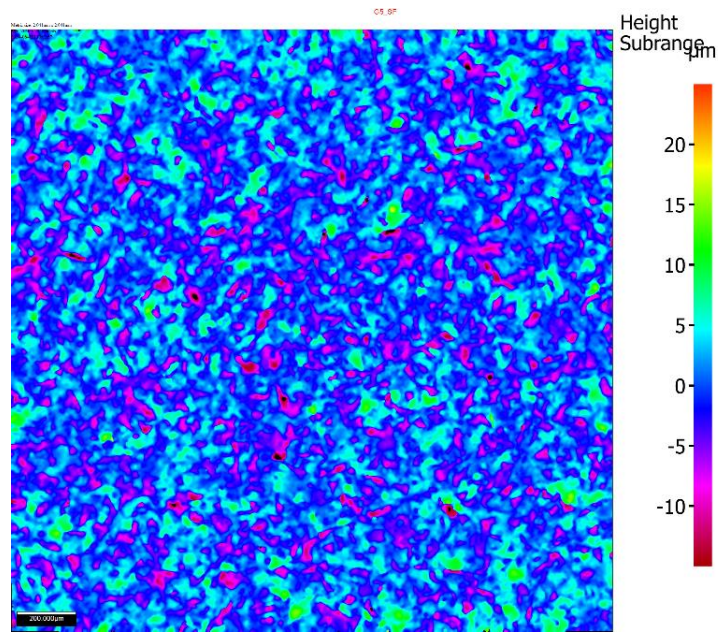


Figura 38. Representación topográfica en μm usando el equipo Alicona® de una superficie de aluminio tratada mediante granallado de corindón.

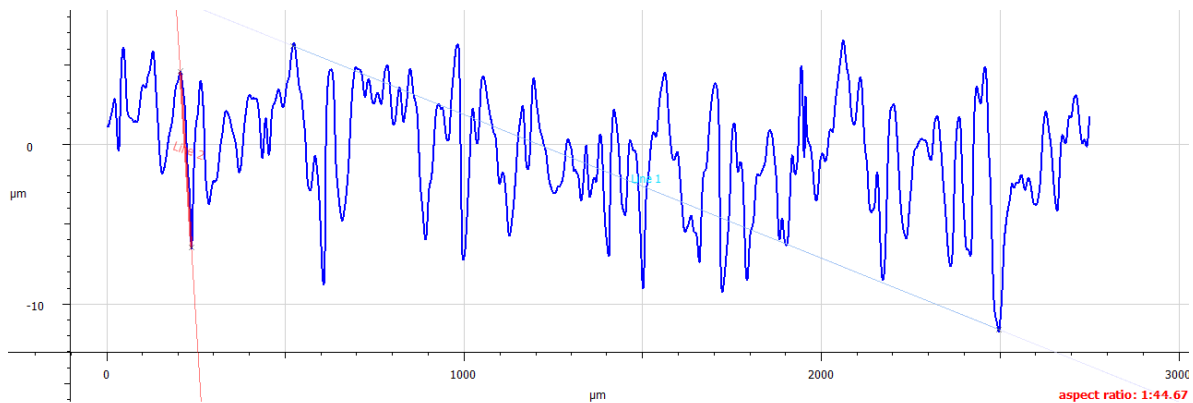


Figura 39. Representación gráfica del perfil de la superficie tratada con corindón a lo largo de 3000 micrómetros mediante aparato Alicona®.

3.3.2. Mojabilidad

Para llevar a cabo este ensayo, se requiere el siguiente equipo: una mesa calibrada, una micropipeta Pipetman Classic del fabricante Gilson, agua destilada, una cámara Nikon, un trípode, un foco y un brazo de apoyo (ver figura 40). A continuación, se detallarán los pasos a seguir para realizar el ensayo de manera adecuada.



Figura 40. Montaje de los útiles necesarios para el ensayo.

El procedimiento por seguir es el siguiente:

1. Se inicia conectando la mesa calibrada a la corriente eléctrica para su auto-calibración, se puede observar en la figura 41. Esta mesa, equipada con sensores de precisión, garantiza que la superficie de trabajo se mantenga nivelada y ajustada para realizar las mediciones con precisión. La calibración automática es fundamental para asegurar que el ángulo de contacto medido sea exacto.

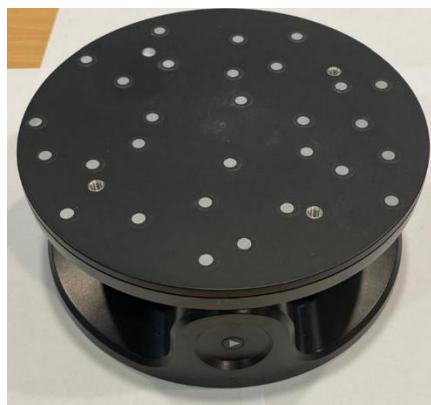


Figura 41. Mesa de calibración automática Revopoint.

2. Se posiciona un foco trasero en el área de trabajo para iluminar la superficie de la probeta de manera uniforme. Este foco tiene la función de proporcionar una iluminación clara y dirigida, lo que facilita la observación y captura precisa de la gota durante el ensayo.
3. Sobre la mesa calibrada, se coloca el sustrato previamente tratado.
4. Se prepara la cámara y se monta sobre un trípode ajustable y se coloca a una altura donde su eje óptico sea paralelo a la superficie del sustrato colocado sobre la mesa. Esto es crucial, ya que el ángulo de captura influirá directamente en la medición del ángulo de contacto. La cámara debe estar enfocada en la zona donde se depositará la gota.
5. Se coloca el brazo metálico sobre un soporte metálico estable. Este brazo tiene la función de permitir la deposición precisa de la gota de líquido en el lugar deseado. Se ajusta a la altura predeterminada sobre el sustrato tratado. El brazo posee un electroimán, el cual, asegura que el brazo permanezca fijo en su posición mientras se realiza el ensayo.
6. Usando una micropipeta Pipetman Classic, se extrae un volumen preciso de 0,10 ml de agua destilada. La micropipeta permite medir volúmenes con alta precisión y garantizar que la cantidad de líquido utilizada en el ensayo sea constante, como se ilustra en la figura 42. A continuación, se muestra una imagen ampliada de la micropipeta.



Figura 42. Micropipeta Pipetman Classic usada para la aplicación de la gota en el ensayo sésil.

7. Usando el brazo metálico como guía, se deposita cuidadosamente la gota sobre la superficie del sustrato tratado, como se observa en la figura 43. Durante este proceso, la cámara captura imágenes en varios momentos de tiempo para poder analizar cómo cambia la forma de la gota y medir el ángulo de contacto en cada instante.



Figura 43. Deposición de gota con pipeta sobre sustrato.

8. Las fotografías obtenidas se transfieren a un ordenador, donde se procesan y se analizan utilizando un software de diseño como AutoCAD. En este software, se trazan los ángulos de contacto de la gota con la superficie del sustrato (figura 44).

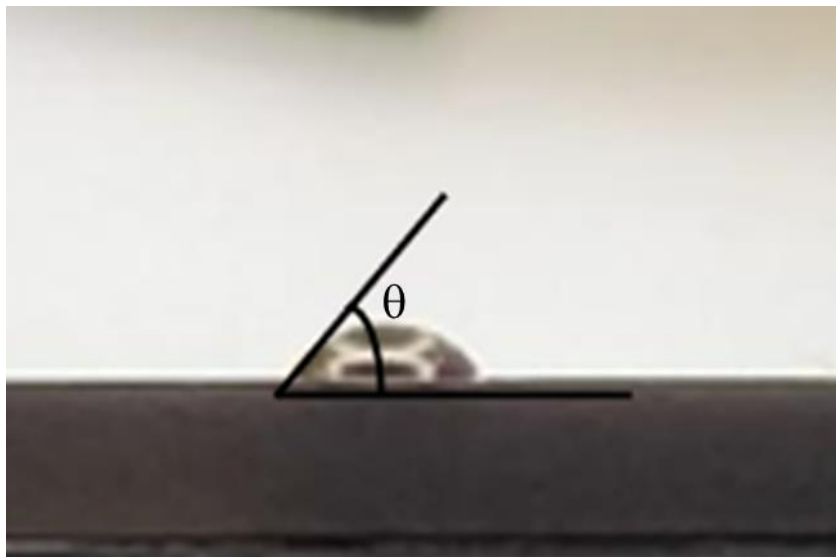


Figura 44. Representación del ángulo de gota sobre el sustrato.



3.4. Caracterización mecánica de las uniones

El objetivo del ensayo mecánico es evaluar la calidad de la unión adhesiva. De acuerdo con la bibliografía encontrada y la revisión de las normas enfocadas a uniones adhesivas, se han optado por el ensayo de tracción por cizallamiento de uniones solapadas regulada en la norma UNE-EN ISO 1465:2009.

Para el ensayo se han utilizado la máquina de tracción de la marca Servosis. El software proporcionado por la marca, utilizado junto con la máquina, es el encargado de recopilar toda la información recogida en el ensayo.

3.4.1 Ensayo de tracción

En los ensayos de tracción, es fundamental que la carga se aplique de forma axial, lo cual requiere una correcta alineación de los elementos de sujeción. Todas las máquinas de tracción deben ser alineadas previamente para garantizar la precisión de los resultados y evitar esfuerzos no deseados sobre las probetas. Por ello, se han optado por un procedimiento de alineación manual que emplea un elemento rígido como referencia y la aplicación de una carga superior a la de trabajo, con el objetivo de asegurar el paralelismo entre mordazas. Asimismo, antes de proceder con los ensayos definitivos, se realizarán pruebas preliminares destinadas a comprobar el funcionamiento del sistema y a caracterizar la respuesta de la célula de carga, con el fin de garantizar la fiabilidad de las mediciones obtenidas.

Para llevar a cabo la alineación, en primer lugar, se colocaron la célula de carga y las mordazas en su posición de trabajo dentro del equipo, como se observa en la figura 45. A continuación, se procedió al aflojamiento de las roscas de apriete de ambas mordazas, permitiendo su libre ajuste. Posteriormente, se introdujo entre las mordazas un elemento rígido y lineal que actuó como referencia para la alineación. Seguidamente, se aplicó una carga superior a la prevista para las probetas de ensayo (en este caso las probetas se estipulan que no van a superar los 400-500 kg de fuerza), con el fin de estabilizar el conjunto y asegurar el paralelismo entre mordazas. Una vez alcanzada la carga deseada, se ajustaron las roscas de apriete con el uso de herramientas adecuadas, fijando la posición definitiva, como se observa en la figura

46. Finalmente, se retiraron tanto la carga como el sustrato de alineación. Este procedimiento permite obtener una alineación suficientemente precisa para el desarrollo fiable de los ensayos posteriores.

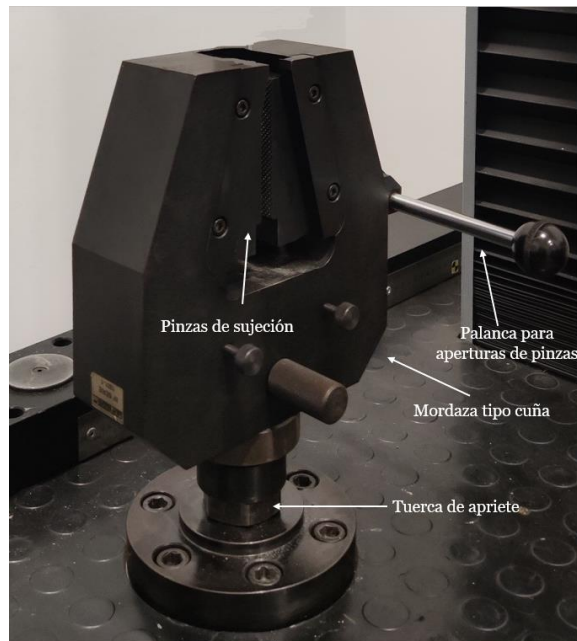


Figura 45. Elementos de la mordaza inferior tipo cuña de la máquina de tracción.

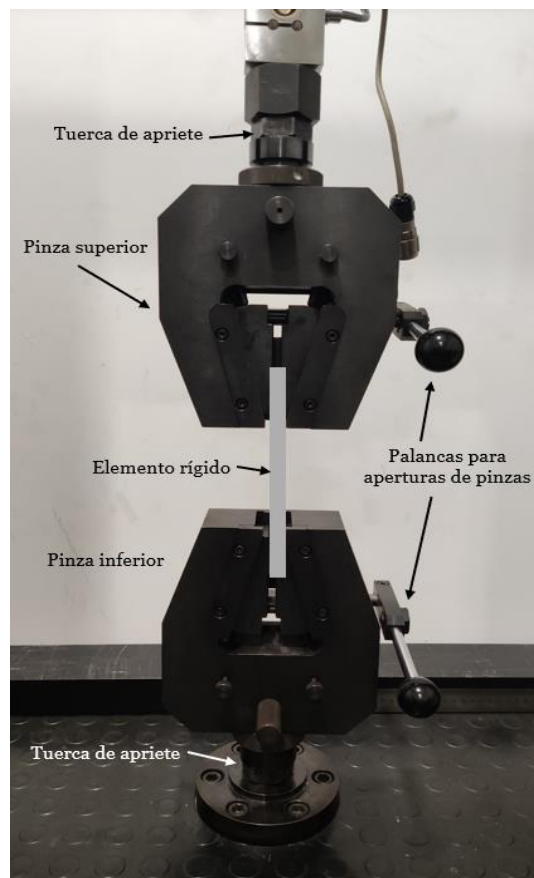


Figura 46. Mordazas tras proceso de alineación.



Una vez completadas las fases previas de alineación y verificación del sistema, se dispone de todos los elementos necesarios para llevar a cabo el ensayo de tracción. El procedimiento seguido se detalla a continuación.

1. Se abre la mordaza inferior del equipo de tracción y se introduce cuidadosamente uno de los extremos de la probeta. Esta debe quedar bien centrada y alineada con el eje de carga para evitar esfuerzos laterales durante el ensayo.
2. Una vez fijado el extremo inferior, se abre la mordaza superior y se introduce el otro extremo de la probeta. Se verifica que la sujeción sea firme y que la probeta mantenga su verticalidad respecto al eje de tracción, como se observa en la figura 47.
3. Con la probeta correctamente instalada, se pone a cero el sistema de adquisición de datos. Esto implica reiniciar las lecturas tanto de posición como de fuerza, estableciendo así un punto de partida para el registro del ensayo.
4. Se ajusta la velocidad de desplazamiento del cabezal móvil a 1 mm/s. Esta velocidad ha sido seleccionada para garantizar una tracción continua, controlada y adecuada al tipo de material ensayado.
5. Se da comienzo al ensayo activando el sistema de tracción. La máquina comienza a aplicar una fuerza creciente sobre la probeta, mientras se registran en tiempo real los datos de carga y desplazamiento.
6. El ensayo se mantiene en ejecución hasta que se produce la rotura de la probeta. Durante este proceso, se supervisa el comportamiento del material y se aseguran las condiciones normales de funcionamiento del equipo.
7. Una vez finalizado el ensayo, se procede a retirar la probeta rota de ambas mordazas. Se revisa el estado de las mordazas y se deja el equipo listo para realizar una nueva medición si fuera necesario.
8. Se guarda los datos proporcionados para la probeta ensayada y se reinicia.



Figura 47. Probeta y elementos de la máquina de tracción durante el proceso de ensayo.

El proceso seguido para el ensayo ha sido el mismo para todas las probetas. En cada ensayo se han guardado los resultados en formato Excel para posteriormente comparar los resultados. En las Figuras 48 y 49 se puede observar una imagen de una de las probetas antes y después de la rotura.

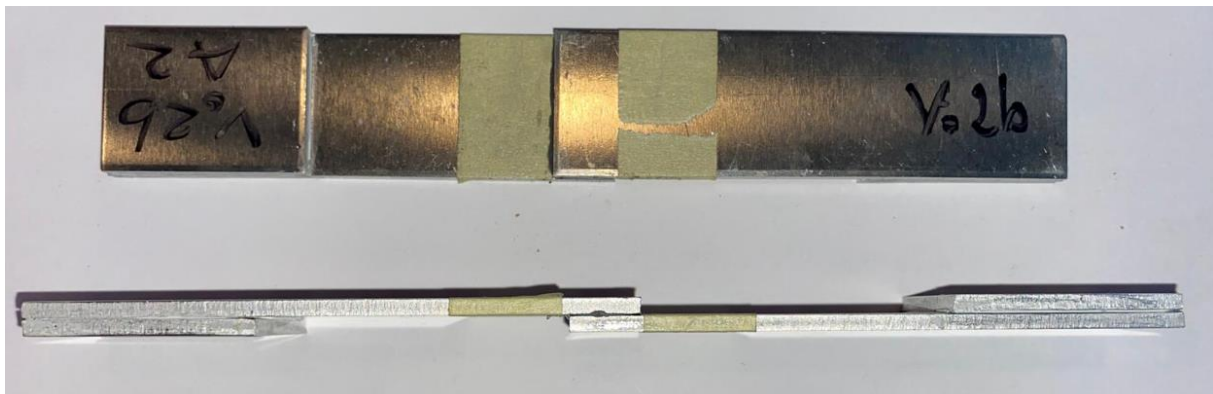


Figura 48. Probetas tras el pegado.



Figura 49. Probetas tras el ensayo de tracción.

En cuanto a la adquisición de datos, el software genera valores de Fuerza (kg) y Desplazamiento (mm) para cada segundo del ensayo. Con estos datos, el objetivo es obtener las curvas de fuerza-desplazamiento para cada una de las probetas. En el eje X se representa el desplazamiento y en el eje Y el esfuerzo, como se observa en la figura 50.

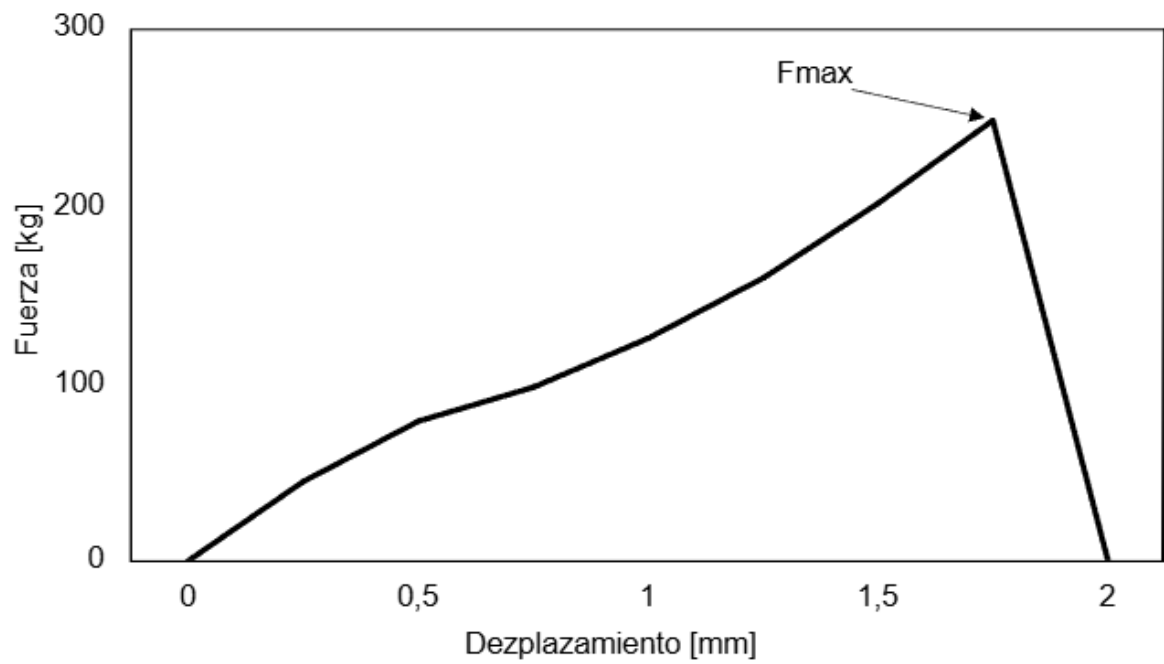


Figura 50. Curva fuerza-desplazamiento obtenida durante el ensayo de tracción. Se indica el valor de la fuerza máxima (F_{max}).



Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo del estudio. Por un lado, se exponen los resultados correspondientes al análisis superficial de las muestras tras el proceso de granallado. Por otro, se detallan los resultados derivados de los ensayos destructivos realizados sobre las probetas una vez fueron pegadas.

4.1. Propiedades de las superficies

El comportamiento de una unión adhesiva está determinado por las características de las superficies que entran en contacto. En este apartado se analizan las propiedades superficiales de las muestras ensayadas, haciendo hincapié en aquellas que afectan a la adhesión, como la rugosidad, la energía superficial y la mojabilidad, así como las modificaciones inducidas por los tratamientos previos.

4.1.1. Inspección visual tras la texturización

Como se han comentado anteriormente, se han utilizado dos tipos de granalla de diferente material que han sido proyectadas bajo diferentes presiones. Una primera inspección visual ya es suficiente para obtener las primeras conclusiones acerca del acabado superficial de la probeta.

La superficie obtenida mediante la texturización con granallas de vidrio se muestra en la figura 51. Las imágenes revelan que el aluminio no texturizado mantiene una superficie homogénea, mientras que, las probetas tratadas con granallas de vidrio presentan una textura distinta. Este tipo de granalla generan unas modificaciones más sutiles y menos agresivas en la superficie, resultando en una apariencia más homogénea, pero con una notable presencia de micro-deformaciones. Las granallas de vidrio, al ser más suaves y menos densas que las metálicas, producen una menor cantidad de cavidades profundas, lo que da lugar a una superficie más uniforme siendo posible apreciar el impacto de las partículas abrasivas.



Figura 51. Superficie de las probetas tras el tratamiento de granallado usando esferas de vidrio a presión 5 bar.

La modificación de la superficie obtenida mediante microscopio para las partículas de vidrio se muestra en la figura 52.

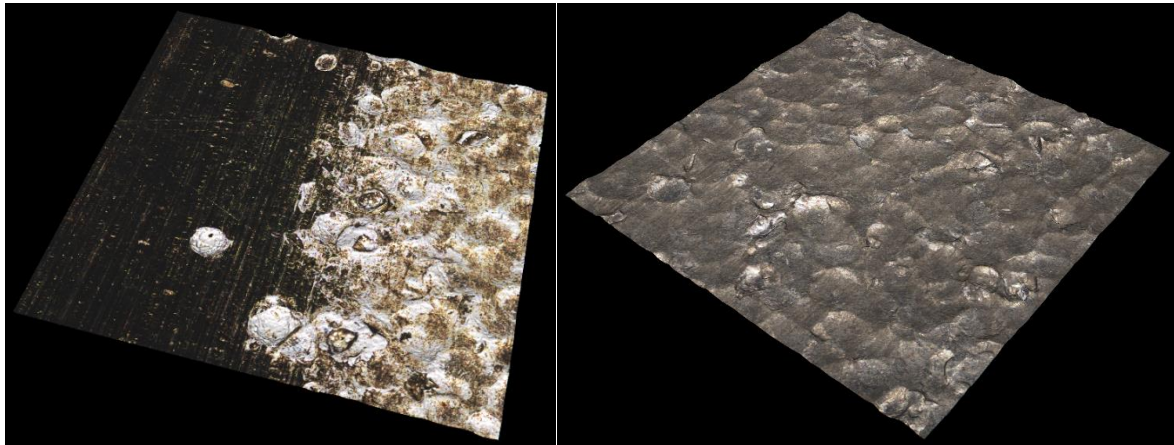


Figura 52. Superficie del sustrato mediante equipo Alicona tras tratamiento con vidrio a 5 bar.

La superficie obtenida mediante la texturización con granallas con partículas de corindón se muestra en la figura 53. En las imágenes las probetas que han sido tratadas con partículas de corindón poseen una textura rugosa y heterogénea. Las granallas metálicas, al ser densas e irregulares, producen una gran cantidad de cavidades profundas, lo que da lugar a una superficie menos uniforme siendo imposible apreciar el impacto de las partículas abrasivas.



Figura 53. Superficie de las probetas tras el tratamiento de granallado usando corindón a presión 5 bar.

La modificación de la superficie obtenida mediante microscopio para las partículas de corindón se muestra en la figura 54.

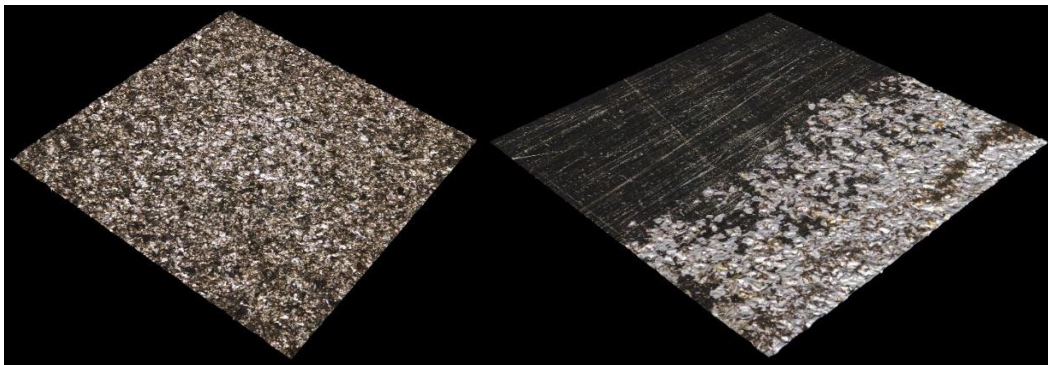


Figura 54. Superficie del sustrato mediante aparato Alicona tras tratamiento con corindón a presión 5 bar.

A simple vista al carecer de la utilización de un aparato especializado se dificulta la forma de determinar unas diferencias que se puedan utilizar para comparar un granallado con otro, como se muestra en la tabla 8.

Presión	Corindón	Vidrio
2 bar		
3 bar		
4 bar		
5 bar		

Tabla 8. Comparación visual tras tratamiento.

Sin embargo, se puede apreciar en la tabla 9 que al utilizar el microscopio las diferencias son apreciables.


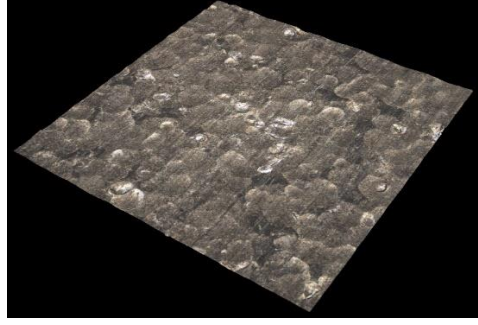

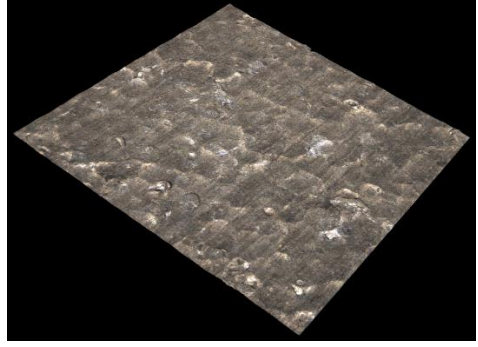

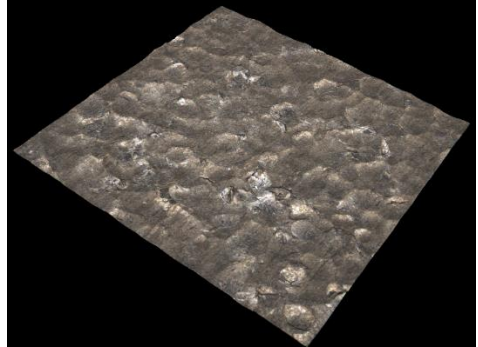

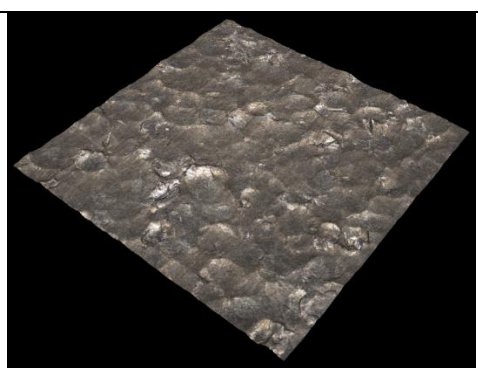
Presión	Corindón	Vidrio
2 bar		
3 bar		
4 bar		
5 bar		

Tabla 9. Comparación visual mediante equipo Alicona tras el tratamiento de granallado.

Las cavidades producidas por las partículas de corindón son para la misma presión de granallados huecos más profundos con incluso arranque de material en zonas de impacto con zonas de

las partículas con picos o zonas filosas. Esto nos da una idea del nivel de mojado de las superficies, siendo mayor en corindón que en vidrio en teoría. Sin embargo, la mayor homogeneidad con menor profundidad de cavidades que se puede apreciar en las superficies para probetas granalladas por partículas de vidrio puede resultar con mejores propiedades mecánicas debido a este reparto igualitario del adhesivo evitando zonas de fallo donde el adhesivo no haya penetrado correctamente.

4.1.2. Caracterización de las superficies usando un microscopio confocal

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis de la rugosidad superficial, evaluados mediante microscopía. Los parámetros de rugosidad seleccionados como representativos son Ra, Sa y Sk. Los valores obtenidos se muestran en la tabla adjunta además de otros valores que se introducen con carácter informativo, en la que se destaca la evolución de los parámetros en función de los tratamientos aplicados: sin granallar, granallado con partículas esféricas de vidrio y granallado con corindón, utilizando distintas presiones (2, 3, 4 y 5 bar).

	Presión (bar)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)	Sa (µm)	Sq (µm)	Sz (µm)	Sk (µm)
Sin Granallar	Sin presión	0,27	0,33	1,64	0,30	0,40	13,79	0,94
Granalla de Vidrio	2	0,96	1,19	4,48	2,35	3,00	55,03	7,86
	3	1,14	1,45	5,94	2,50	3,24	57,04	8,04
	4	1,28	1,68	5,72	3,08	3,93	86,29	9,78
	5	1,53	1,99	7,28	3,44	4,39	93,81	10,90
Granalla de corindón	2	1,23	1,50	6,52	1,74	2,26	25,53	5,43
	3	2,00	2,65	11,76	2,20	2,83	51,22	6,96
	4	1,70	2,16	10,51	2,76	3,65	93,78	8,49
	5	2,41	3,00	12,02	2,84	3,72	57,83	8,73

Tabla 10. Resultados numéricos obtenidos por equipo Alicona.

Probetas Sin Tratamiento

Las probetas sin granallar sirven como referencia inicial en el estudio. Al analizar sus características, se observa que la superficie presenta una uniformidad notable, sin alteraciones significativas, lo que indica que no han sido sometida a ningún proceso abrasivo. Este estado es crucial, ya que nos permite comparar con precisión los efectos del granallado.

Los valores obtenidos de las probetas sin granallar son consistentemente bajos en todos los parámetros de rugosidad, tal como se esperaba. Como se muestra en la figura 55, los valores de Ra y Sa son tan reducidos que las posibles imperfecciones en la superficie resultan de escasa relevancia, lo que demuestra que la superficie es lo suficientemente lisa para servir como una base adecuada para las comparaciones posteriores.

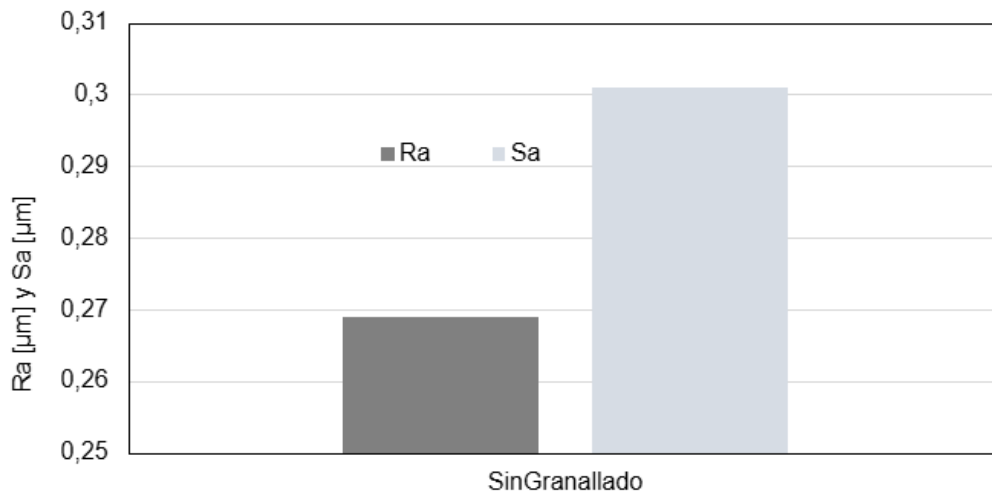


Figura 55. Comparación de Ra y Sa en probetas sin tratamiento.

Si bien los parámetros Ra y Sa ofrecen una estimación general de la rugosidad superficial, la disponibilidad de tecnología avanzada permite complementar el análisis con parámetros adicionales. En este caso, se ha prestado especial atención al valor de Sk, cuya proximidad a cero indica una distribución homogénea de la rugosidad en las probetas analizadas.

Probetas Granalladas con Partículas Esféricas de Vidrio

El tratamiento con partículas esféricas de vidrio provoca cambios significativos en la superficie del material. Partiendo de la referencia de la superficie no tratada, este tipo de granalla al ser esférica sin imperfecciones en su estructura aumenta la rugosidad de manera uniforme y controlada.

El análisis de las probetas tratadas mediante granallado con partículas de vidrio revela un incremento progresivo de la rugosidad superficial conforme aumenta la presión aplicada, tal como se muestra en la figura 56. Los valores de los parámetros Ra y Sa siguen una tendencia ascendente, alcanzando valores máximos de 1,531 µm y 3,440 µm, respectivamente. Cabe destacar que el incremento de presión de 3 a 4 bar produce un aumento notablemente mayor en el valor de Sa en comparación con el incremento observado entre 2 y 3 bar. Este comportamiento sugiere que, a partir de cierto umbral de presión, el impacto del tratamiento sobre la superficie se intensifica, generando irregularidades o imperfecciones más marcadas.

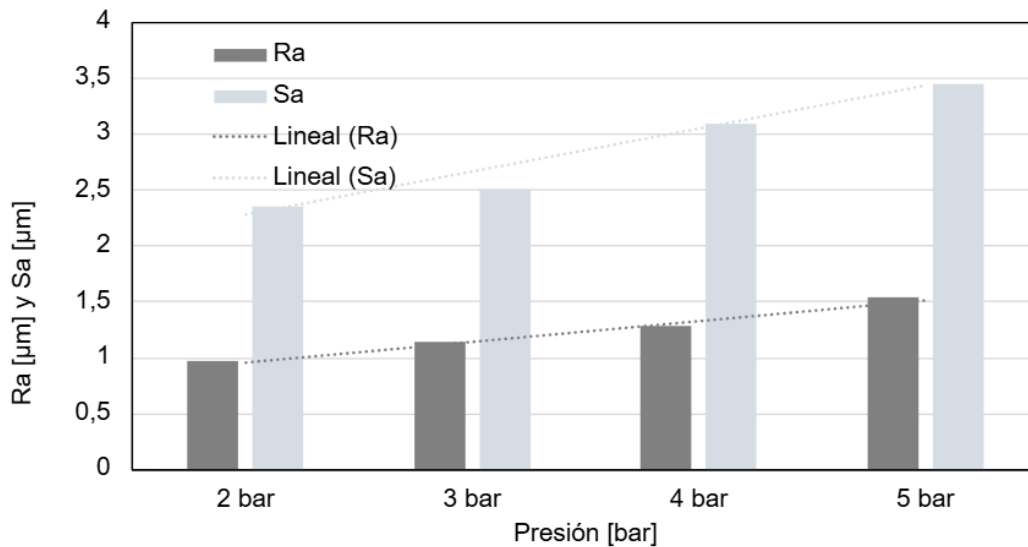


Figura 56. Comparación de Ra y Sa en probetas tratadas con vidrio.

En cambio, Sk por su parte, confirma que las alteraciones se concentran en las capas externas sin penetrar de manera agresiva en la estructura subyacente del material (figura 57).

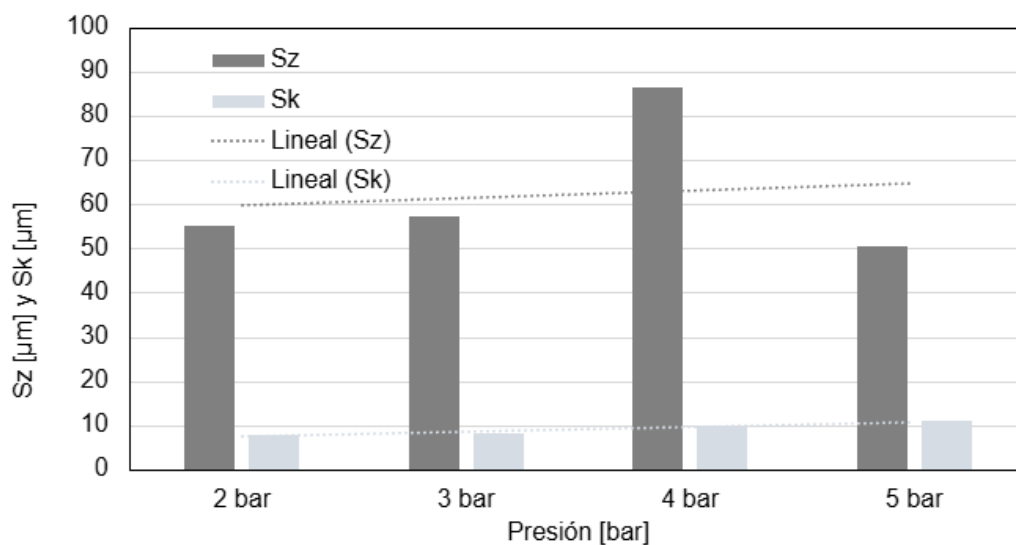


Figura 57. Comparación de Sz y Sk en probetas tratadas con vidrio.

Probetas Granalladas con Corindón

El tratamiento con partículas de corindón provoca cambios significativos en la superficie del material. Partiendo de la referencia de la superficie no tratada, este tipo de granalla al ser partículas irregulares con una gran cantidad de imperfecciones en su estructura aumenta la rugosidad de manera incontrolada.

El análisis de las probetas tratadas mediante granallado con partículas de corindón muestra un incremento generalizado de la rugosidad superficial en todos los parámetros conforme aumenta la

presión de impacto, tal como se observa en la figura 58. Los valores de Ra y Sa siguen una tendencia ascendente, alcanzando máximos de 2,413 μm y 2,848 μm , respectivamente. No obstante, se observa un descenso significativo en el valor de Ra a 4 bar, lo cual puede deberse a dos posibles factores. Por un lado, es posible que la línea de medición haya coincidido con zonas de la superficie donde no se generaron imperfecciones relevantes, debido a la distribución irregular del tratamiento. Por otro lado, también cabe la posibilidad de que, a dicha presión, las partículas de corindón hayan comenzado a erosionar o aliviar parcialmente la matriz del material, dando lugar a un aplanamiento local de la superficie.

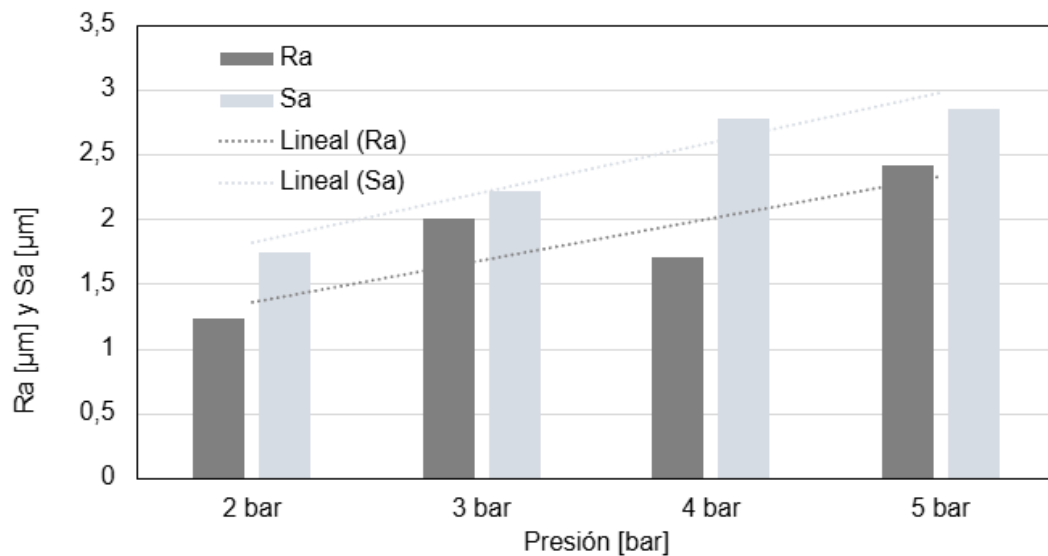


Figura 58. Comparación de Ra y Sa en probetas tratadas con corindón.

Por otro lado, Sk por su parte, apreciando su tendencia y valores confirma que las alteraciones se concentran en las capas externas sin penetrar de manera agresiva en la estructura subyacente del material (figura 59).

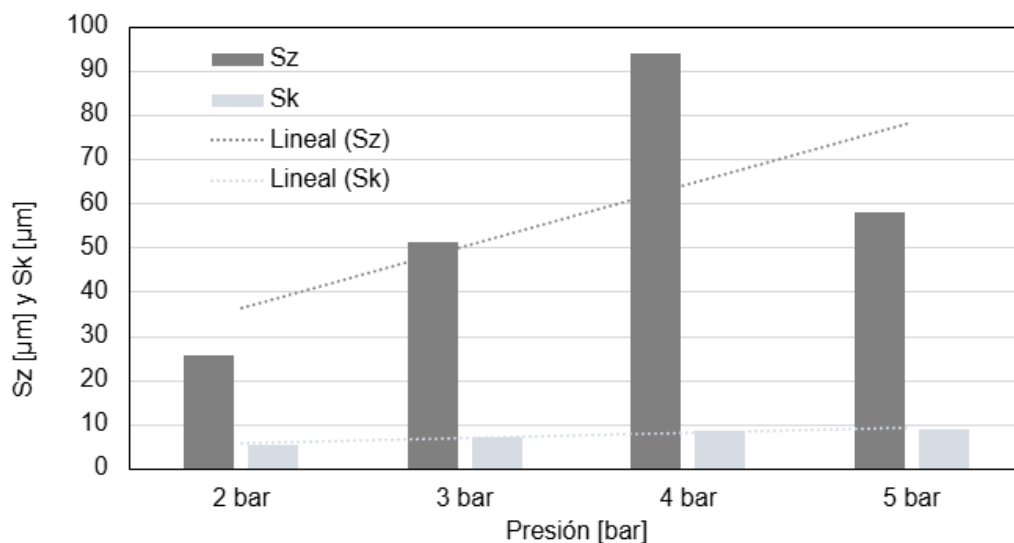


Figura 59. Comparación de Sz y Sk en probetas tratadas con corindón.

Comparación

El objetivo de esta comparación es identificar las variaciones clave en la rugosidad superficial generada por cada tratamiento, destacando las características específicas de cada abrasivo y evaluando su impacto en la superficie del material. Se han tomado los valores más representativos para desarrollar la comparación con mayor exactitud (figura 60).

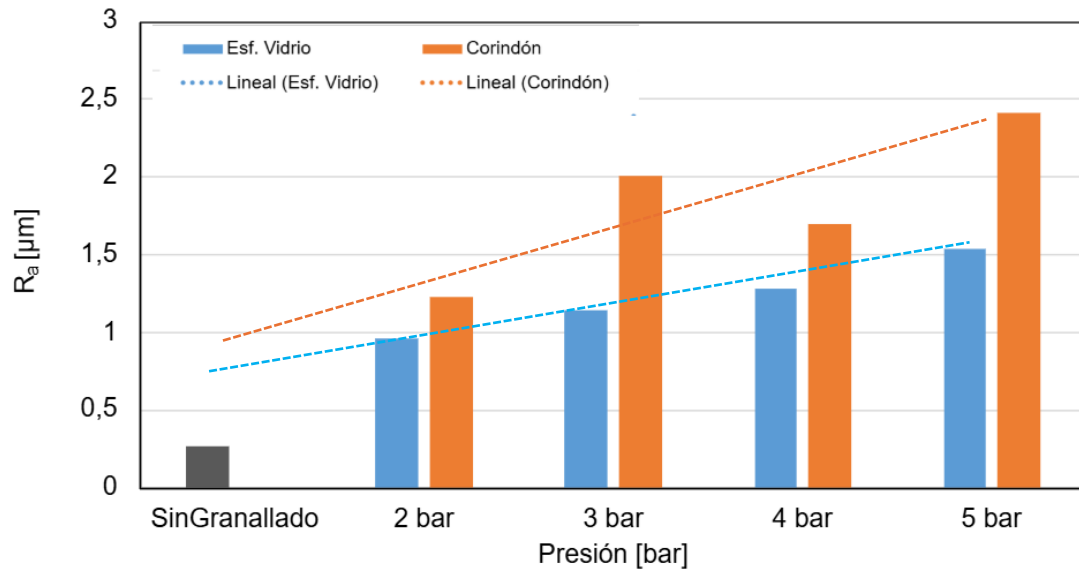


Figura 60. Comparación con parámetro Ra.

El tratamiento con corindón produce valores de Ra más elevados en comparación con el vidrio para un mismo valor de presión debido a la mayor dureza y angulosidad de sus partículas, lo que genera una superficie inicialmente más áspera y menos uniforme. Además, se observa que la pendiente de la curva de rugosidad en función de la presión es similar para ambos tipos de abrasivo, lo que indica un comportamiento comparativo en cuanto a la progresión del efecto con el aumento de la presión.

Al contrastar los resultados con la superficie sin tratamiento, las partículas de vidrio muestran una evolución más regular y gradual desde la superficie de referencia, siguiendo una tendencia coherente a medida que se incrementa la presión. En cambio, el comportamiento del corindón presenta mayores fluctuaciones y no se aproxima a la morfología de la superficie original, lo que pone de manifiesto su mayor agresividad e irregularidad en el proceso de modificación superficial.

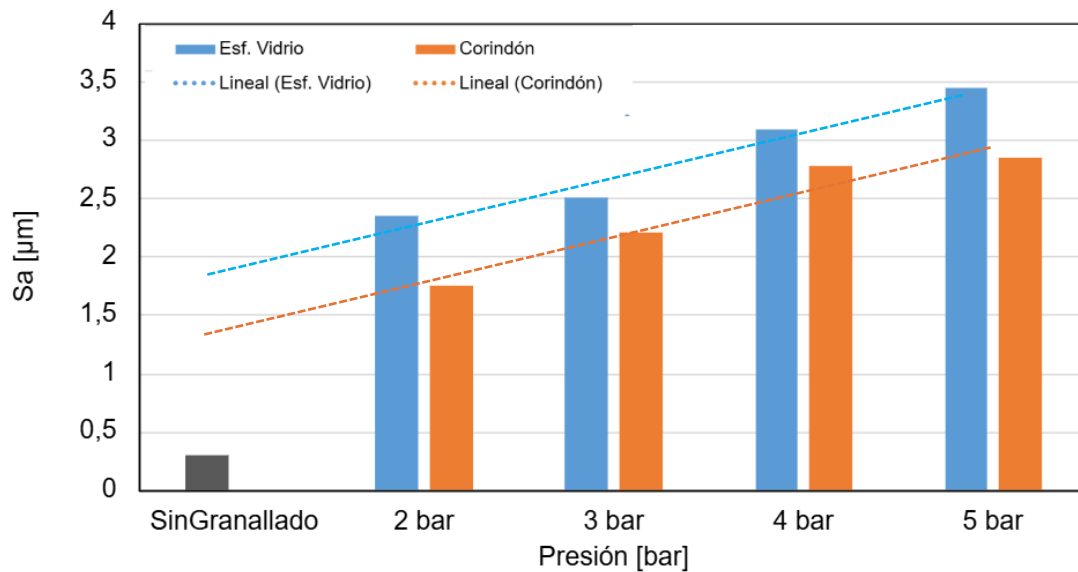


Figura 61. Comparación con parámetro Sa.

A diferencia de Ra, Sa (figura 61) revela que los valores y la tendencia observados con Ra eran casos puntuales que no ofrecían resultados concluyentes para poder llegar a una conclusión definitiva.

En primer lugar, los valores de Sa en el corindón son menores en todas las presiones en comparación con las partículas esféricas de vidrio. Las tendencias, a medida que aumenta la presión, son más pronunciadas en vidrio que en corindón, mostrando comportamientos claramente distintos entre ambos materiales.

Sin embargo, al comparar con la superficie sin granallar, las partículas de vidrio siguen una tendencia uniforme desde el principio, como se mencionó anteriormente, con un aumento gradual de la rugosidad a medida que la presión aumenta. En cambio, el corindón muestra una irregularidad más marcada, lo que confirma su comportamiento diferente en la evolución de la rugosidad.

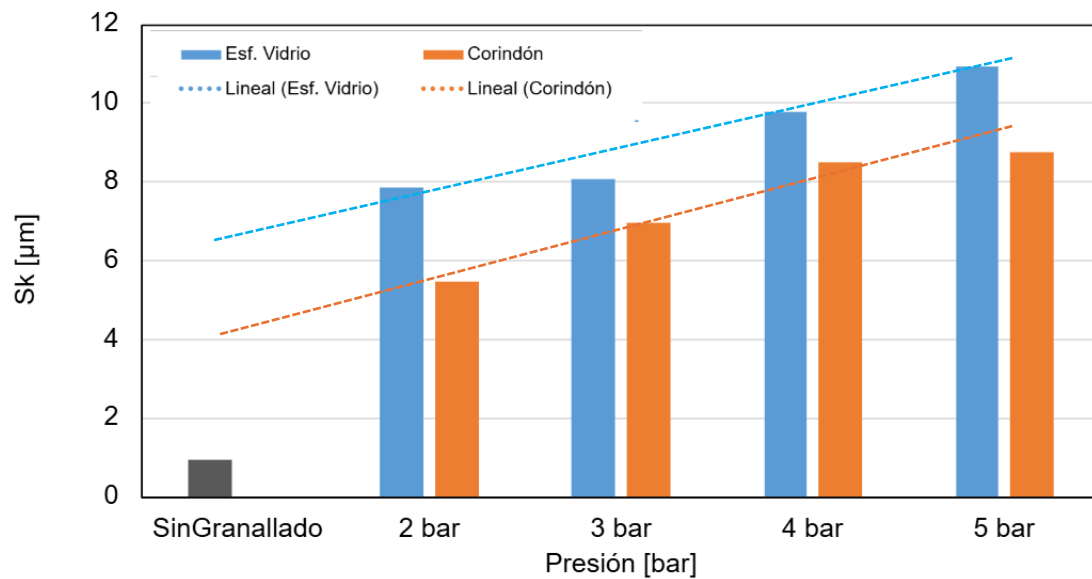


Figura 62. Comparación con parámetro Sk.

El vidrio genera un Sk mayor que el corindón (figura 62), indicando que el tratamiento con partículas esféricas de vidrio causa una mayor penetración en el núcleo de la rugosidad. Esto quiere decir que las partículas esféricas de vidrio logran modificar y compactar de manera más profunda la estructura superficial, lo que podría mejorar ciertas propiedades mecánicas o funcionales, como la resistencia a la fatiga o la adhesión.

4.1.3. Energía libre y mojabilidad

El objetivo de este apartado es fundamental para entender la interacción entre el material y el adhesivo que se deposita sobre su superficie, como se aprecia en la figura 63.

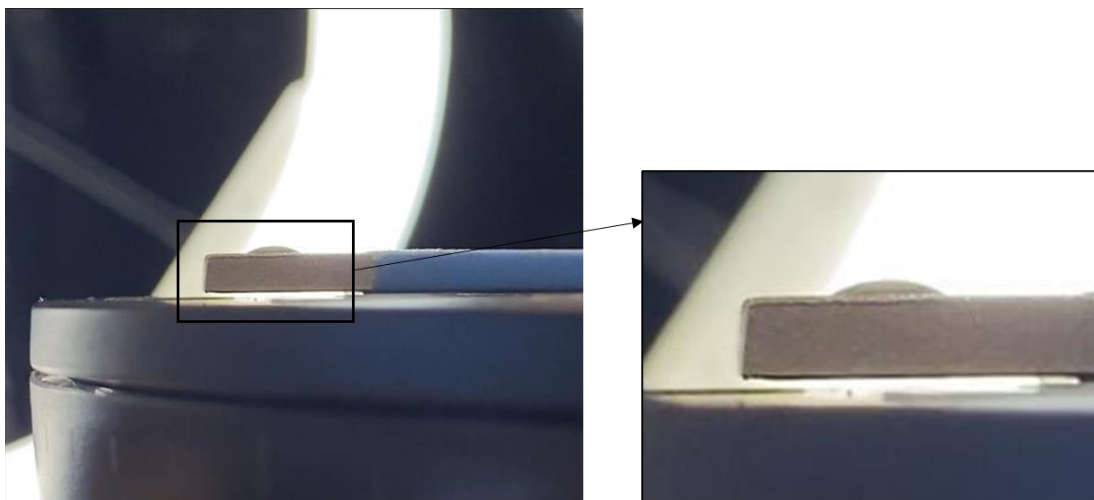


Figura 63. Ejemplo de resultado del ensayo de gota sésil.

En la siguiente tabla y gráfica se muestran los valores de ángulos de contacto obtenidos en el ensayo.

	Angulo contacto (°)
Sin Granallar	55
Granalla de Vidrio	36
	27
	23
	18
Granalla de corindón	33
	19
	11
	14

Tabla 11. Resultados del ensayo de gota sésil.

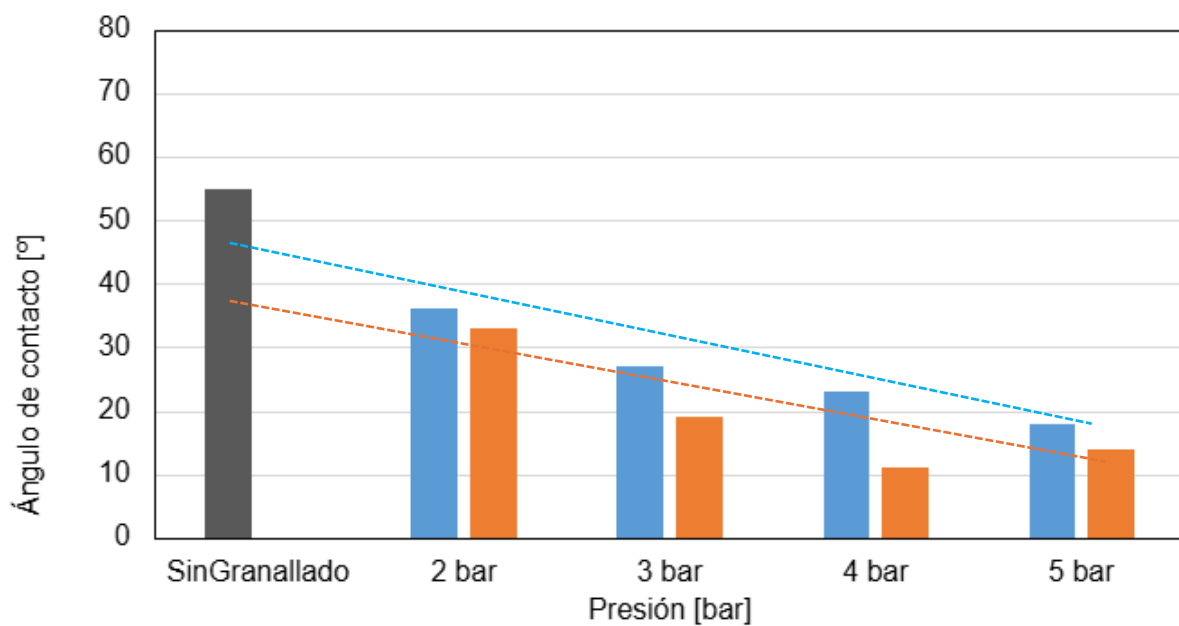


Figura 64. Representación gráfica de los resultados.

- Probetas Sin Granallado

El ángulo de contacto medido en la superficie fue de 55° (ver figura 65a), lo que indica una interacción moderada entre la superficie del material y el líquido aplicado. Este valor relativamente alto sugiere que la energía libre superficial de la muestra es baja, lo que implica que la superficie presenta una resistencia significativa a la mojabilidad. En términos prácticos, esto indica que la superficie tiende

a repeler el líquido en lugar de permitir una difusión extensa, lo que podría influir en su comportamiento en procesos de adhesión o en aplicaciones donde la interacción con líquidos es crítica.

- Probetas Granalladas con Partículas Esféricas de Vidrio

A mayor presión de granallado, el ángulo de contacto disminuye (ver figura 65b), de 36° para 2 bar, a 18° para 5 bar. Este cambio significativo indica que un aumento en la presión de granallado resulta en una superficie más rugosa y activa. La reducción del ángulo de contacto sugiere un incremento en la energía libre superficial del material y la mojabilidad. Esto se debe a la mayor creación de micro imperfecciones y áreas de contacto en la superficie, que facilitan la adhesión del líquido. Una mayor mojabilidad favorece la adhesión y el recubrimiento.

- Probetas Granalladas con Corindón

Los resultados muestran una tendencia similar al caso de partículas esféricas de vidrio. Al aumentar la presión de granallado, el ángulo de contacto disminuye alcanzando valores de 14° para 5 bar (figura 65c). Esto sugiere que el uso de corindón es más efectivo para incrementar la energía libre superficial, lo cual se traduce en mayor mojabilidad y por tanto adhesión.

Los datos obtenidos confirman que las superficies texturizadas, tanto con esferas como con corindón, presentan ángulos de contacto considerablemente más bajos que la superficie sin tratar. Esto evidencia que el tratamiento superficial incrementa la energía libre superficial, promoviendo una mayor interacción entre la superficie y el líquido. Los resultados son especialmente pronunciados a mayores presiones, donde el ángulo de contacto se reduce drásticamente, indicando que una mayor rugosidad y activación de la superficie favorecen la expansión del líquido y mejoran las propiedades de adhesión.

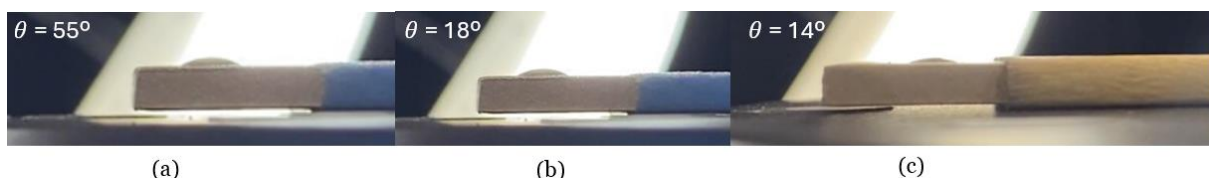


Figura 65. (a) Ejemplo de resultado en probeta sin granallar. (b) Ejemplo de resultado en probeta tratadas con vidrio a 5 bar. (c) Ejemplo de resultado en probeta tratadas con corindón a 5 bar.

En el siguiente apartado, los resultados relativos a la rugosidad y la mojabilidad en las superficies de aluminio serán relacionados con la resistencia a la tracción de las uniones.

4.2. Caracterización mecánica de las uniones.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados a distintos tipos de uniones. Este análisis tiene el fin de comparar las propiedades mecánicas con las características superficiales de las probetas, tanto tratadas con granalla, como sin tratar.



4.2.1. Inspección visual tras el ensayo de tracción.

A simple vista, se dificulta realizar una primera clasificación del tipo de fallo observado en las probetas.

En todos los ensayos a tracción realizados, el único modo de fallo observado siguiendo los estipulados por la norma UNE-EN ISO-10365, ha sido el fallo adhesivo AF. Este tipo de fallo se caracteriza por la separación limpia entre el adhesivo y las superficies del sustrato, sin que se produzca rotura interna del adhesivo. El adhesivo queda adherido por completo a una de las superficies o en ambas caras de las superficies.

En las figuras 66a y 66b se observan claramente las diferencias entre las uniones tratadas y no tratadas. En el caso de las muestras no tratadas (66b), se aprecia visualmente un espesor de adhesivo mucho más fino y con una apariencia más transparente. Esto sugiere que, al no haber rugosidad en la superficie del aluminio, el adhesivo no ha tenido anclaje mecánico suficiente y ha podido escurrirse durante el proceso de curado, reduciendo así su espesor efectivo y comprometiendo la calidad de la unión.

Por el contrario, aunque el modo de fallo sigue siendo adhesivo también en las muestras tratadas (figura 66a), se observan diferencias notables en la superficie fracturada. En estas muestras, el adhesivo presenta una distribución más uniforme, un mayor espesor aparente y una menor transparencia, lo que sugiere una mejor retención durante el curado. Esto se debe a la mayor rugosidad generada por la proyección de partículas abrasivas, que proporciona una superficie más favorable para el anclaje del adhesivo, aunque no ha sido suficiente para provocar un cambio en el tipo de fallo.



Figura 66. (a) Ejemplo de resultados Fallo cohesivo del adhesivo AF en donde el adhesivo está situado en una sola probeta. (b) Ejemplo de resultados Fallo cohesivo del adhesivo AF en donde el adhesivo está situado en ambas probetas.

Presión	Sin granallar
0 bar	

Tabla 12. Resultados tras ensayo de tracción en probetas sin granallar.





















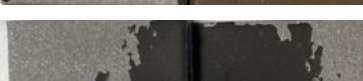



Presión	Corindón	Vidrio
2 bar		
		
		
3 bar		
		
		
4 bar		
		
		
5 bar		
		
		

Tabla 13. Resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas.

En todas las probetas analizadas se presentó el mismo tipo de fallo, lo cual indica una cierta consistencia en la naturaleza de la falla. No obstante, se identificaron dos variantes en la forma en que dicho fallo se manifestó. En un primer caso, el adhesivo quedó completamente adherido a una de las caras de la unión, mientras que, en el segundo caso, el adhesivo se dividió de manera casi equitativa entre ambas superficies, quedando aproximadamente la mitad en cada una.

Estas diferencias en la manifestación del fallo, a pesar de compartir el mismo tipo, podrían deberse a varios factores. Uno de ellos podría ser la distribución no uniforme del adhesivo durante la aplicación. También es posible que existan ligeras variaciones en la presión aplicada durante el ensamblaje o en el alineamiento de las superficies adheridas. Además, pequeñas inconsistencias en el proceso de curado.

Otro aspecto para considerar son las propiedades superficiales de los sustratos, como la rugosidad, la energía superficial o la presencia de contaminantes, que podrían afectar la adhesión del pegamento de manera localizada.

4.2.2. Resultados de los ensayos de tracción

Los datos presentados, que incluyen las fuerzas máximas alcanzadas por cada probeta, ofrecen una visión clara del comportamiento de las uniones tanto sin texturización como aquellas tratadas mediante texturización superficial. En las siguientes secciones, se analizarán y discutirán los resultados obtenidos, desglosando cada tipo de unión y realizando una comparación detallada entre ellas.

	Presión (bar)	Esfuerzo medio de las tres probetas [kg]
Sin Granallar	Sin presión	126,58
Granalla de Vidrio	2	199,47
	3	206,01
	4	185,02
	5	115,23
Granalla de corindón	2	150,51
	3	142,90
	4	198,51
	5	208,57

Tabla 14. Resultados numéricos tras ensayo de tracción.

Uniones sin Texturización (Sin Granalla).

Los resultados obtenidos (figura 67) muestran que las probetas sin tratamiento de granallado alcanzaron una resistencia media de 126,58 kg durante los ensayos de tracción. Este valor refleja el

comportamiento del material en su estado original, sin modificaciones en su superficie que puedan influir en la adhesión.

La superficie sin tratar mantiene sus características iniciales, lo que implica que la interacción con el adhesivo se produce directamente sobre el acabado natural del material. En estas condiciones, la adhesión depende exclusivamente de la compatibilidad química entre el adhesivo y el sustrato, sin la influencia de factores adicionales como una gran rugosidad superficial o el anclaje mecánico.

Este resultado proporciona una referencia fundamental para evaluar el efecto de los tratamientos superficiales en la resistencia de las uniones adhesivas, permitiendo analizar hasta qué punto las modificaciones en la superficie pueden mejorar o afectar el comportamiento del sistema de unión.



Figura 67. Ejemplo de resultados tras ensayo de tracción en probetas sin granallar.

Uniones con Texturización (Vidrio).

Los resultados obtenidos muestran una relación entre la presión utilizada en el proceso de granallado con vidrio y la resistencia máxima alcanzada por las probetas durante los ensayos de tracción. Sin embargo, el comportamiento de la resistencia no sigue una tendencia lineal con el incremento de la presión (figura 68).

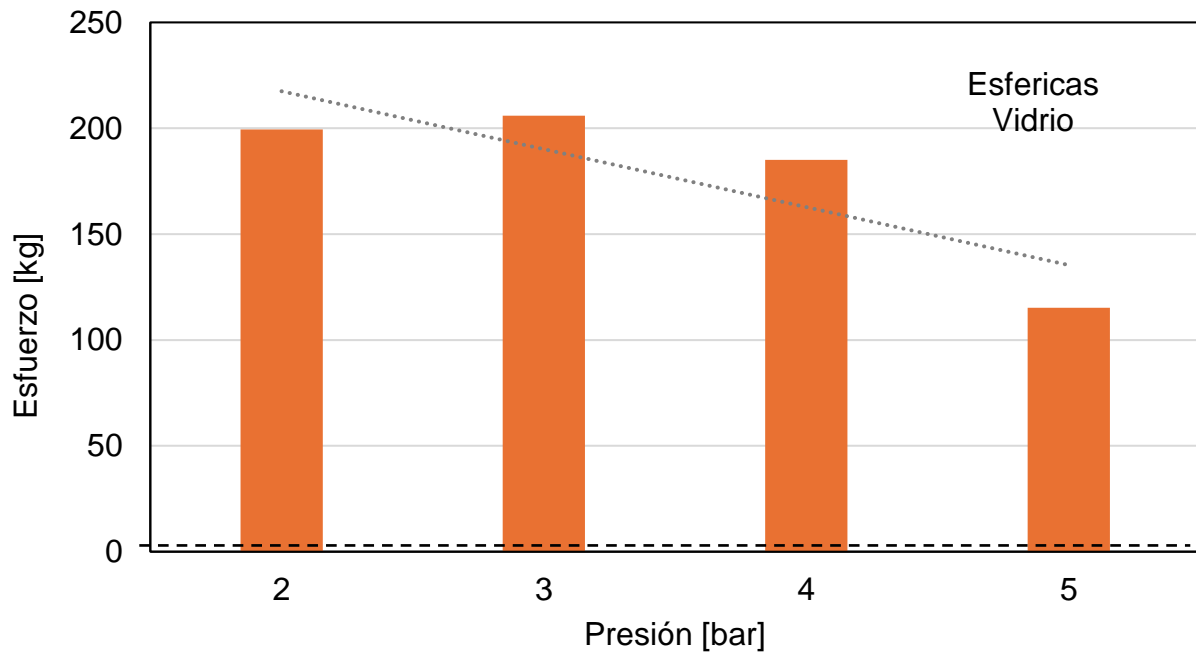


Figura 68. Resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con vidrio.

Las probetas tratadas a una presión de 2 bar alcanzaron una resistencia máxima de 199,47 kg, mostrando mejores resistencias que a presiones de 4 y 5 bar. Al incrementar la presión a 3 bar, se observó un ligero aumento en la resistencia, alcanzando un valor de 206,01 kg. Esto sugiere que un mayor impacto de las partículas de vidrio pudo haber generado una rugosidad superficial más favorable para la adhesión. Sin embargo, a partir de 4 bar, la resistencia mostró una disminución inesperada, con un valor de 185,02 kg. Esto podría indicar que, a esta presión, el impacto del granallado comienza a afectar negativamente la superficie, posiblemente generando una alteración microestructural que compromete la adherencia. Esta tendencia se hace aún más evidente en las probetas tratadas a la mayor presión de 5 bar, donde la resistencia máxima registrada fue de 115,23 kg, la más baja del estudio.

Estos resultados sugieren que, en el caso del granallado con vidrio (figura 69), existe un umbral óptimo de presión en torno a los 3 bar, donde se obtiene la mejor combinación entre rugosidad y adherencia sin comprometer la integridad superficial del material. A presiones más elevadas, el tratamiento podría estar generando defectos que reducen la eficacia de la unión adhesiva.

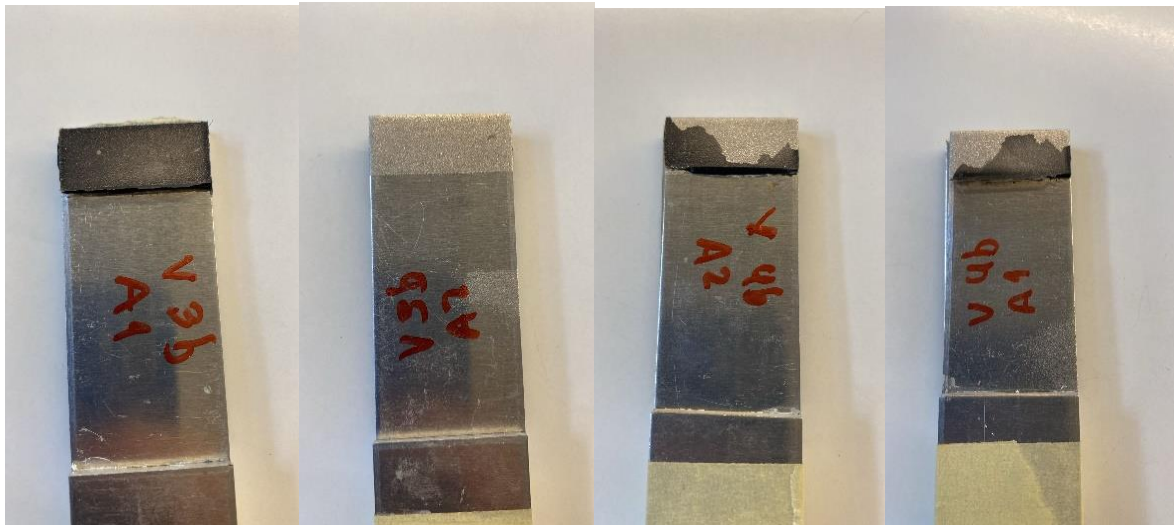


Figura 69. Ejemplo de resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con vidrio.

Uniones con Texturización (Corindón)

Los resultados (figura 70) indican una clara relación entre la presión utilizada en el proceso de granallado y la resistencia máxima alcanzada por las probetas durante los ensayos de tracción. Se observó que a medida que la presión de granallado aumentaba, la resistencia de las probetas tendía a mejorar, alcanzando un valor máximo en las muestras tratadas a la mayor presión (5 bar). Esto sugiere que un mayor impacto de las partículas de corindón durante el granallado puede incrementar la rugosidad superficial de las probetas, favoreciendo la interacción mecánica en las uniones.

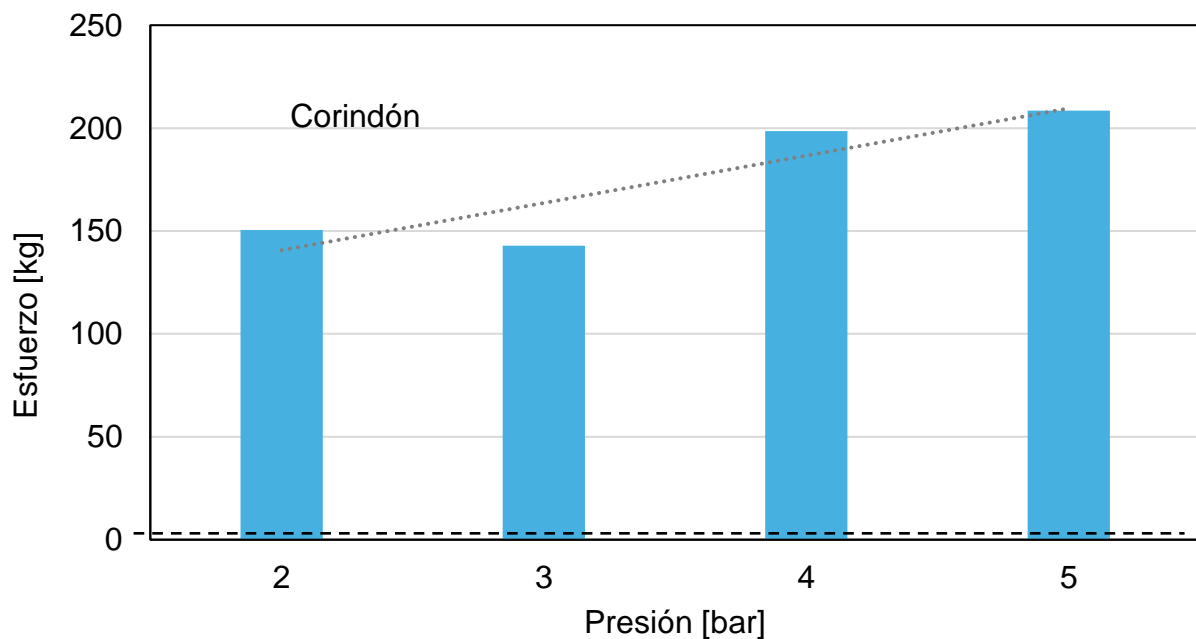


Figura 70. Resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con corindón.

Las probetas tratadas a una presión de 2 bar alcanzaron una resistencia inferior a aquellas granalladas a presiones más altas. Esto puede explicarse por la menor intensidad del impacto de las partículas de corindón sobre la superficie, lo que podría resultar en una rugosidad menor. Con un aumento en la presión a 3 bar, las probetas mostraron un ligero decremento en su resistencia. Sin embargo, el descenso no fue tan significativo, lo que podría indicar que a esta presión las partículas aún no generan una modificación sustancial en la superficie respecto a la presión más baja. Sin embargo, las probetas sometidas a 4 bar de presión alcanzaron un aumento considerable en su resistencia máxima. Este comportamiento sugiere que a esta presión el tratamiento superficial empieza a ser más efectivo, favoreciendo una mejor interacción en las uniones. Para la última presión de 5 bar registraron la mayor resistencia máxima durante los ensayos (figura 71). Esto refuerza la hipótesis de que una mayor presión de granallado intensifica las modificaciones superficiales, maximizando la adherencia y la capacidad de carga.



Figura 71. Ejemplo de resultados tras ensayo de tracción en probetas tratadas con corindón.

Análisis de los resultados del ensayo a tracción en términos de fuerza máxima.

Se han analizado los resultados obtenidos en las probetas sin tratamiento de granallado, así como en aquellas sometidas a distintos procesos de texturización superficial mediante granalla de vidrio y corindón, con el objetivo de evaluar la influencia de la preparación de la superficie en la resistencia de las uniones adhesivas.

En la figura 72 se representan los valores de carga máxima (F_{max}) soportados por cada una de las probetas antes de que se produzca el fallo de la unión adhesiva. En el eje X se indica la presión de proyección utilizada durante el proceso de granallado, mientras que en el eje Y se recogen los valores correspondientes de F_{max} . Para las probetas sin tratamiento, se han asignado un valor de presión igual a cero. Los diferentes tratamientos se identifican mediante símbolos diferenciados: los círculos

representan las probetas tratadas con corindón, los cuadrados aquellas tratadas con granalla de vidrio, y los triángulos corresponden a las probetas sin tratamiento superficial.

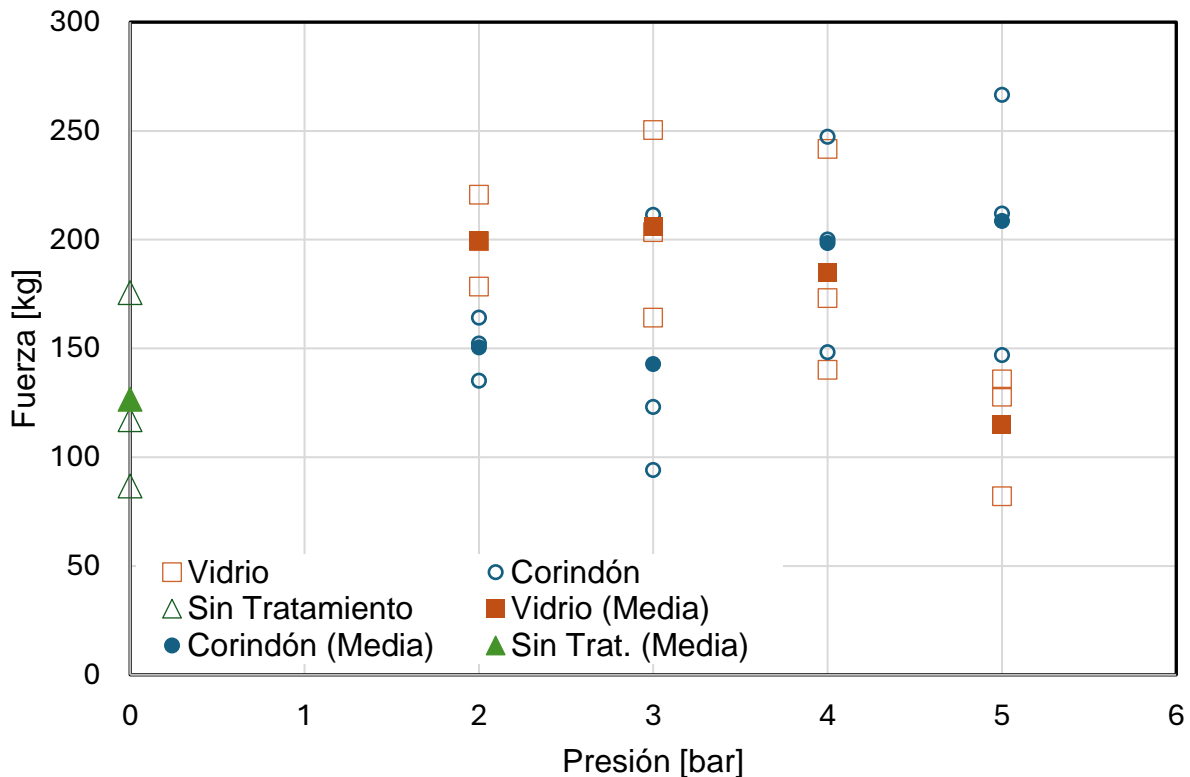


Figura 72. Representación de los valores comparados tras ensayo de tracción en probetas tratadas y sin tratar.

Como es habitual en este tipo de ensayos, se observa una cierta dispersión en los resultados, aunque dentro de márgenes razonables. Esta variabilidad se explica por diversos factores que pueden influir significativamente en la resistencia final de la unión adhesiva, tales como la cantidad de adhesivo aplicado, la correcta alineación de las probetas durante el ensamblaje, o las condiciones ambientales (temperatura, humedad) durante el proceso de aplicación y curado. Por tanto, para obtener conclusiones sólidas, resulta imprescindible realizar un análisis estadístico que complemente la información gráfica.

Con este propósito, en la figura 73 se presentan los valores promedio de F_{max} obtenidos para cada grupo de ensayo representado previamente. En esta gráfica, la línea azul muestra la evolución del valor medio de resistencia para las probetas tratadas con corindón, mientras que la línea naranja representa los valores medios correspondientes a las tratadas con vidrio. Esta representación permite identificar con mayor claridad las tendencias generales de cada tratamiento y comparar de forma más directa su eficacia relativa en términos de resistencia mecánica de la unión.

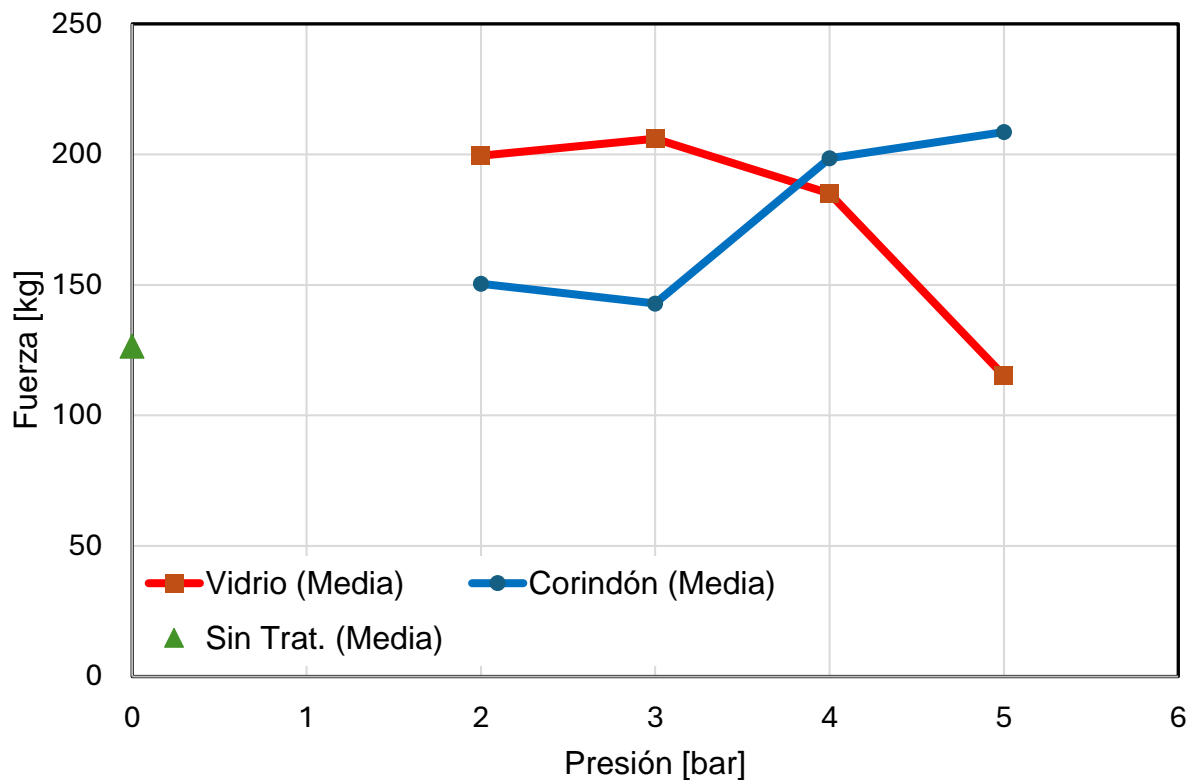


Figura 73. Representación de los valores medios comparados tras ensayo de tracción en probetas tratadas y sin tratar.

El análisis detallado de los datos pone de manifiesto comportamientos diferenciados en función del tipo de granalla utilizada. En el caso del granallado con vidrio, se observa un rendimiento máximo a una presión de 3 bar, alcanzando un valor de resistencia de 206,01 kg. Este dato sugiere que, a dicha presión, se generó una rugosidad superficial óptima que favoreció la adhesión, mejorando la interacción entre el adhesivo y el sustrato. Sin embargo, al incrementar la presión a 4 bar, se produjo una disminución progresiva de la resistencia, acentuándose este efecto a 5 bar, donde se alcanzó el valor más bajo (115,23 kg). Este comportamiento indica que presiones excesivas pueden provocar un sobretratamiento de la superficie, generando una textura demasiado rugosa o incluso daños que comprometen la calidad de la unión.

En contraste, el comportamiento observado con el granallado con corindón fue claramente distinto. A medida que se incrementaba la presión de proyección, también lo hacía la resistencia de las uniones, alcanzando su valor máximo en las probetas tratadas a 5 bar. Este resultado sugiere que el corindón produce una texturización progresivamente más favorable para la adhesión incluso a presiones elevadas, sin mostrar efectos negativos sobre la superficie tratada.

Estos resultados ponen de relieve la importancia de una correcta selección del tratamiento superficial para optimizar la resistencia de las uniones adhesivas. Mientras que la granalla de vidrio ofrece su mejor rendimiento a una presión moderada (3 bar), el corindón muestra una tendencia ascendente continua hasta al menos 5 bar.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



En términos generales, puede observarse que las probetas sometidas a tratamiento de granallado alcanzan valores de carga máxima (F_{max}) superiores en comparación con las probetas de referencia, es decir, aquellas sin tratamiento superficial. Este comportamiento confirma la eficacia del granallado como método de preparación de superficies para mejorar la resistencia de las uniones adhesivas.



Capítulo 5

Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha analizado el proceso de granallado de superficies de chapa de aluminio 2024-T3 mediante la aplicación de partículas abrasivas, con el objetivo de optimizar la preparación del sustrato para su posterior unión adhesiva.

El propósito de este estudio es determinar los parámetros de granallado que permitan mejorar las propiedades superficiales del material, combinando diferentes tipos de abrasivos con distintas presiones de aplicación. Se busca evaluar cómo estas variaciones influyen en factores clave como la rugosidad, la mojabilidad y la resistencia mecánica de la unión adhesiva.

Para ello, se han diseñado una metodología que abarca desde la preparación de las chapas hasta la aplicación de los tratamientos superficiales, estableciendo un protocolo sistemático para la evaluación de sus efectos. Se han analizado diferentes combinaciones de presión y tipo de abrasivo, con el fin de identificar las condiciones óptimas para maximizar la adhesión.

Finalmente, se han obtenido y analizado una serie de resultados individuales que han permitido desarrollar modelos predictivos, estableciendo relaciones entre los parámetros de granallado y el desempeño de la unión adhesiva. Estos resultados han sido discutidos en detalle para determinar el impacto real del tratamiento superficial en la calidad final de la unión.

5.1. Conclusiones Generales

Se han demostrado que la aplicación de un tratamiento superficial mediante granallado mecánico con partículas abrasivas mejora significativamente la resistencia mecánica de las uniones adhesivas en chapas de aluminio 2024-T3. Este proceso modifica de manera efectiva las propiedades superficiales del material, especialmente en términos de rugosidad, mojabilidad y energía superficial, factores determinantes para optimizar la adhesión estructural y la durabilidad de las uniones.

Los tratamientos superficiales aplicados han permitido modificar las características del sustrato de manera controlada, favoreciendo la interacción entre el adhesivo y el aluminio. En particular, se han observado que la elección adecuada de los parámetros de granallado influye directamente en la capacidad de anclaje mecánico, promoviendo una distribución homogénea del adhesivo y asegurando una unión más resistente y duradera.



5.2. Conclusiones Específicas

A partir del análisis de los distintos tratamientos aplicados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El granallado con corindón ha generado un aumento significativo en la rugosidad de la superficie, como evidencian los parámetros Ra, Sa y Sk, favoreciendo la adhesión y mejorando la resistencia a la tracción de las uniones. Se han observado una tendencia creciente en la resistencia con el aumento de la presión de granallado.
- El granallado con vidrio mostró un comportamiento no lineal, alcanzando su máxima eficacia a una presión de 3 bar, sin que los valores de rugosidad fueran los más altos. A partir de esta presión, la resistencia disminuyó, lo que sugiere que una rugosidad excesiva puede comprometer la adhesión.
- Las probetas sin tratamiento superficial presentaron la menor resistencia adhesiva, lo que confirma la importancia del pretratamiento de la superficie para optimizar la adhesión. Estas muestras fueron las que mostraron menor mojabilidad y menores valores de rugosidad.
- El tratamiento a baja presión (2 bar) proporcionó mejoras moderadas en la resistencia de las uniones, aunque sin alcanzar valores óptimos, lo que indica que una presión insuficiente no genera una rugosidad adecuada para mejorar la adhesión.
- El exceso de presión en el granallado con vidrio (5 bar) afectó negativamente la resistencia, lo que sugiere que un tratamiento demasiado agresivo puede deteriorar la superficie del material y reducir la capacidad de adhesión.
- El aumento de la rugosidad superficial ha estado directamente relacionado con una mayor resistencia mecánica en la mayoría de los casos, aunque su efecto depende del tipo de abrasivo utilizado.

5.3 Conclusión Final

Para lograr una adhesión óptima en las uniones analizadas, los mejores resultados se han obtenido mediante el granallado con corindón a alta presión y el granallado con vidrio a presión moderada (3 bar). Estos tratamientos han demostrado ser los más efectivos para incrementar la rugosidad, mejorar la mojabilidad y potenciar la resistencia mecánica de las uniones adhesivas, asegurando un rendimiento estructural superior.



5.4. Líneas futuras

Aunque se han alcanzado varias conclusiones en el apartado anterior, estas también dan lugar a nuevas áreas de investigación que buscan mejorar y optimizar los resultados obtenidos hasta el momento.

Una de las futuras líneas de investigación consiste en el uso de máquinas de granallado automatizadas, con control preciso de parámetros como la distancia y la velocidad de pasada, minimizando así el margen de error asociado al factor humano. En la actualidad, las máquinas de granallado convencionales requieren la intervención manual para ajustar estos parámetros, lo que puede generar variabilidad en los resultados. Al emplear sistemas automatizados, se podrían obtener superficies más homogéneas y repetibles, lo que contribuiría a mejorar la calidad de la rugosidad generada y, por ende, la adhesión de los materiales. Además, la automatización permitiría la integración de sistemas de monitoreo en tiempo real para ajustar de manera continua las variables durante el proceso, optimizando los resultados y reduciendo la posibilidad de errores.

Otra línea importante de investigación se centra en el control y optimización de la temperatura del adhesivo durante el proceso de curado. El comportamiento del adhesivo es altamente sensible a las condiciones térmicas, y una temperatura inadecuada puede afectar negativamente sus propiedades adhesivas, como la resistencia y la durabilidad de la unión. Es crucial determinar el rango de temperatura específico en el que el adhesivo alcanza su máxima eficacia. La implementación de sistemas de control térmico en los procesos de aplicación y curado permitirá identificar las condiciones óptimas para cada tipo de adhesivo, lo que se traduciría en un mejor rendimiento en aplicaciones industriales. Además, esta línea de investigación podría extenderse a la evaluación de la estabilidad térmica del adhesivo en condiciones extremas, lo cual es relevante en muchos sectores como la automoción, la aeronáutica o la electrónica, donde las variaciones térmicas son frecuentes y pueden comprometer la fiabilidad de las uniones.



Capítulo 6

Bibliografía

Adams, R. D. , C. J. , & W. W. C. (1997). *Structural adhesive joints in engineering*. Springer Science & Business Media.

adhesives, D. P.-I. journal of adhesion and, & 2003, undefined. (2003). Surface energy, surface topography and adhesion. *Elsevier*, 23, 437–448.

AULA DE MECANICA: AMOVIBLES. (n.d.). Retrieved May 14, 2025, from

Bañon, F., Sambruno, A., Fernandez-Vidal, S., & Fernandez-Vidal, S. R. (2019). One-Shot Drilling Analysis of Stack CFRP/UNS A92024 Bonding by Adhesive. *Materials*, 12(1), 160.

Benatar, A. (2017). Plastics Joining. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition*, 575–591.

Bermejo López, R. (2016). *Análisis del comportamiento a fatiga de uniones adhesivas de acero recubierto* [Universidad Politécnica de Madrid].

Berrocal, L. (2007). *Resistencia de materiales*.

Blackman, B., ... A. K.-I. J. of, & 2012, undefined. (2012). The fracture behaviour of adhesively-bonded composite joints: Effects of rate of test and mode of loading. *ElsevierBRK Blackman, AJ Kinloch, FS Rodriguez-Sanchez, WS TeoInternational Journal of Solids and Structures*, 2012•Elsevier.

Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Rodriguez Sanchez, F. S., Teo, W. S., & Williams, J. G. (2009). The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing. *ElsevierBRK Blackman, AJ Kinloch, FSR Sanchez, WS Teo, JG WilliamsEngineering Fracture Mechanics*, 2009•Elsevier, 76, 2868–2889.

Childs, P. R. N. (2021). Tolerancing and Precision Engineering. *Mechanical Design*, 413–449.

De, F., Químicas, C., Barriuso, S., Directores, G., Luis, J., Carrasco, G., & Lieblich Rodríguez, M. (2014). *UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID TESIS DOCTORAL Modificación superficial de biomateriales metálicos (316 LVM y Ti6Al4V) mediante granallado, agua a alta presión y “laser peening”: efecto en la microestructura, las propiedades mecánicas y la liberación de iones MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR PRESENTADA POR.*

Dunn, D. J. . (2003). *Adhesives and sealants : technology, applications and markets*. 164.

Hartshorn, S. R. (1986). The Durability of Structural Adhesive Joints. In *Structural Adhesives* (pp. 347–406). Springer US.



- Jordá-Vilaplana, A., Fombuena, V., García-García, D., Sánchez-Nácher, L., & García-Sanoguera, D. (2014). *Mejora de las propiedades adhesivas de PLA/PLA mediante adhesivos biodegradables*.
- Khan, A., Kheraif, A. Al, ... S. A.-I. J. of, & 2016, undefined. (2016). Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium. *Elsevier*.
- Kumar, N., Prakash, S., & Kumar, S. (2016). Studies of laser textured Ti-6Al-4V wettability for implants. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149, 012056.
- Leena, K., Athira, K., Bhuvaneswari, S., ... S. S.-I. journal of, & 2016, undefined. (2016). Effect of surface pre-treatment on surface characteristics and adhesive bond strength of aluminium alloy. *Elsevier*.
- Madrid, M. (1997). *TECNOLOGÍA DE LA ADHESIÓN*.
- Mechanical Fastening. (2009). *Handbook of Plastics Joining*, 175–201.
- Mittal, K. L. (2007). *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion, Volume 4*. CRC Press.
- Modi, U., & Prakash, S. (2019). *Wettability of 3D printed polylactic acid (PLA) parts*. 030052.
- Molera Solá, Pere. (1992). *Soldadura industrial : clases y aplicaciones*. 121.
- Núñez, C. , R. A. , & J. J. (2013). *Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen II. Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos*. .
- Piña Piña, G., Rodríguez Lelis, J. M., & Solano Pérez, J. J. (2021). Determinación de la energía libre superficial del líquido sinovial humano en biomateriales. *CIENCIA Ergo-Sum*, 28(3).
- Prieto, J. N., Jiménez, E. P., & Romero, J. R. (2011). *Estudio de las modificaciones superficiales producidas en muestras de aluminio sometidas a distintos tratamientos superficiales*.
- Robinson, K. J., & Thissen, H. (2024). Selecting the best surface analysis method for your materials/samples. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 42(4).
- Rodríguez García-Cebadera, Á., & González, A. Q. (2010). *Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales*.
- Salguero Gómez, J., & Salguero Gómez, J. (2013). Análisis, evaluación y propuestas de mejora del rendimiento del mecanizado de alta velocidad de aleaciones de aluminio de interés en la industria aeronáutica. *Análisis, Evaluación y Propuestas de Mejora Del Rendimiento Del Mecanizado de Alta Velocidad de Aleaciones de Aluminio de Interés En La Industria Aeronáutica*.
- Sánchez Matrán, F. (2010). *Uniones adhesivas y sus aplicaciones navales*.
- Simmons, C. H., Phelps, N., & Maguire, T. L. D. E. (2012). Limits and Fits. *Manual of Engineering Drawing*, 175–182.
- Speck, J. A. (2018). *Mechanical Fastening, Joining, and Assembly*. CRC Press.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Tipos de uniones soldadas: guía completa sobre soldaduras y usos. (n.d.). Retrieved May 14, 2025.

UNE-EN 923. (2016).

Wahab, M. M. A., Bartolomé, J. F., Chicot, D., & Lowther, J. E. (2012). Fatigue in adhesively bonded joints: a review. *Wiley Online LibraryMM Abdel WahabInternational Scholarly Research Notices, 2012*•*Wiley Online Library, 2012*, 1–25.

Zielecki, W., Pawlus, P., Perłowski, R., & Dzierwa, A. (2013). Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pre-treatment. *SpringerW Zielecfe, P Pawlus, R Perłowski, A DzierwaArchives of Civil and Mechanical Engineering, 2013*•*Springer, 13(2)*, 175–185.