

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**DESARROLLO, MEJORA Y  
OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE *HOT  
STAMPING* PARA EL ALIGERAMIENTO  
DE PIEZAS ESTRUCTURALES DE  
ALEACIONES DE ALUMINIO DE ALTA  
RESISTENCIA**

**Unai Ibarreche López**

**Máster Universitario en Ingeniería Industrial**

Dirigido por **Ainhoa Lejardi Meavebasterrechea**  
y **Ester Zuza Hernández**

Departamento de Ingeniería de Materiales

Curso 2017-2018



# I. RESUMEN TRILINGÜE + PALABRAS CLAVE

*Alumno:* Unai Ibarreche López

*Directora:* Ainhoa Lejardi Meavebasterrechea

*Co-Directora:* Ester Zuza Hernández

*Departamento:* Departamento de Ingeniería de Materiales

*Título del Trabajo:* Desarrollo, mejora y optimización de procesos de *Hot Stamping* para el aligeramiento de piezas estructurales de aleaciones de aluminio de alta resistencia.

*Resumen:* El objetivo fundamental de este proyecto es caracterizar aleaciones de aluminio de alta resistencia y optimizar tanto los tratamientos térmicos como los procesos de estampación en caliente existentes para el aligeramiento de piezas estructurales en automoción y aeronáutica. Para ello, se hará uso de chapas laminadas de aleación de aluminio para forja con distintos espesores y provenientes principalmente de dos familias, AA6xxx y AA7xxx. Dichos materiales, después de ser mecanizados para la obtención de probetas, se caracterizarán por separado con el fin de establecer los parámetros óptimos para su posterior tratamiento térmico. Una vez los materiales hayan sido caracterizados empleando hornos, simulaciones, estudios de micrografía, ensayos de tracción, de compresión y de dureza, se estudiarán distintos métodos de temple, como el temple en agua o el temple en prensa, además de estudiar la influencia de la velocidad de deformación en el estado *W-temper*.

*Palabras clave:* *W-Temper* – *Hot Stamping* – Aleación de aluminio de alta resistencia

*Izenburua:* Erresistentzia altuko aluminio aleaziozko egitura piezen pisu murrizketarako *Hot Stamping* prozesuen garapena, hobekuntza eta optimizazioa

*Laburpena:* Proiektu honen eginkizun nagusia erresistentzia altuko aluminio aleazioen karakterizazioa burutzea eta tratamendu termiko zein *Hot Stamping* prozesuen optimizazioa garatzea da aeronautika eta automobilgintzako egitura piezen pisu murrizketarako. Horretarako, lodiera ezberdineko eta bi familia nagusiko forjaketarako aluminio aleaziozko txapak erabiliko dira, AA6xxx eta AA7xxx. Material horiek mekanizatu ostean entsegu probetak lortzeko asmoz, karakterizatu egingo dira ondorengo tratamendu termikoen parametro egokienak zehazteko. Behin karakterizatuta labeen, simulazioen, mikrografia ikasketen eta trakzio, konpresio eta gogortasun entseguen laguntzarekin, tenplatzeko modu ezberdinak aztertuak izango dira, uretan zein prentsan tenplatuz, *W-temper* egoeran deformazio abiadurak daukan eraginak aztertzeaz gain.

*Hitz-gakoak:* *W-Temper* – *Hot Stamping* – Erresistentzia altuko aluminio aleazioa



*Title:* Development, improvement and optimization of *hot stamping* processes for lightening structural body parts of high strength aluminium alloys.

*Abstract:* The main objective of this project is to characterize high strength aluminium alloys and optimize the heat treatments as well as the existing Hot Stamping processes to lighten structural body parts for automotive and aeronautic industry. To that end, laminated wrought aluminium alloy sheets will be used with different thicknesses and mainly from two families, AA6xxx and AA7xxx. After they have been mechanized to obtain test pieces, those materials will be individually characterized in order to determine the optimal parameters for their subsequent thermal treatment. Once the materials are characterized using industrial furnaces, simulations, micrograph studies and tensile, compression and hardness tests, different quenching methods will be studied, such as water or press quenching, as well as studying the influence of the strain rate in the *W-temper* state.

*Keywords:* *W-temper* – Hot stamping – High strength aluminium alloy



## II. ÍNDICE

I.	RESUMEN TRILINGÜE + PALABRAS CLAVE .....	3
II.	ÍNDICE .....	5
III.	LISTA DE TABLAS .....	8
IV.	LISTA DE ILUSTRACIONES.....	9
V.	LISTA DE GRÁFICAS.....	12
VI.	NOMENCLATURA.....	15
1.	INTRODUCCIÓN .....	17
2.	CONTEXTO.....	20
3.	OBJETIVOS Y ALCANCE .....	24
4.	BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO .....	25
4.1.	<i>Beneficios científicos / técnicos</i> .....	25
4.2.	<i>Beneficios económicos</i> .....	27
4.3.	<i>Beneficios sociales</i> .....	28
4.4.	<i>Beneficios medioambientales</i> .....	29
5.	ESTADO DEL ARTE.....	31
5.1.	<i>Aleaciones de Aluminio de alta resistencia (AAAR)</i> .....	31
5.1.1.	Aplicaciones.....	33
5.2.	<i>Tratamientos térmicos (TT)</i> .....	36
5.2.1.	Tipos de Hornos.....	37
5.2.2.	Tratamiento térmico de Solución (SHT) .....	38
5.2.3.	Métodos de temple (curvas “C”).....	40
5.2.4.	Envejecimiento Natural y Artificial .....	42
5.3.	<i>Conformado en caliente</i> .....	44
5.3.1.	<i>Hot Forming</i> tradicional.....	45
5.3.2.	<i>Warm Forming</i> .....	46
5.3.3.	Conformado en estado <i>W-Temper</i> .....	48
6.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS .....	50
6.1.	<i>Elección del Material</i> .....	50
6.1.1.	Aleaciones de aluminios de alta resistencia (AAAR).....	50
6.1.2.	Otros aluminios .....	50
6.1.3.	Materiales Compuestos .....	51



---

6.1.4.	Aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) .....	51
6.1.5.	Otras aleaciones no-férreas .....	52
6.2.	<i>Conformado</i> .....	55
6.3.1.	Estampación en caliente .....	55
6.3.2.	Estampación en frío.....	56
6.3.3.	Fundición y mecanizado .....	56
6.3.4.	Tixo-conformado (SSM).....	57
<b>7.</b>	<b>EQUIPO DE LABORATORIO Y PROCEDIMIENTOS .....</b>	<b>59</b>
7.1.	<i>Centro de mecanizado con CNC</i> .....	59
7.2.	<i>Hornos de mufla</i> .....	60
7.3.	<i>Durezas</i> .....	61
7.4.	<i>Ensayos de tracción</i> .....	62
7.5.	<i>Ensayos de compresión en prensa</i> .....	62
7.6.	<i>Micrografía y estudio en SEM</i> .....	63
7.7.	<i>Calorimetría diferencial de barrido (DSC)</i> .....	65
<b>8.</b>	<b>METODOLOGÍA Y RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
8.1.	<i>Caracterización del material en estado de compra</i> .....	67
8.2.	<i>Optimización del tratamiento térmico</i> .....	75
8.2.1.	Estudio del calentamiento del horno y la pieza .....	75
8.2.2.	Ajuste de parámetros de los tratamientos térmicos .....	77
8.2.2.1.	SHT óptimo .....	77
8.2.2.2.	Envejecimiento .....	78
8.2.2.3.	Propiedades finales .....	85
8.2.2.4.	Temple .....	88
8.3.	<i>Proceso de conformado en estado W-temper</i> .....	93
8.3.1.	Influencia de la deformación.....	93
8.3.2.	Influencia de la Velocidad de deformación .....	96
<b>9.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE TAREAS Y CRONOGRAMA.....</b>	<b>99</b>
9.1.	<i>Equipo de trabajo e investigación</i> .....	99
9.2.	<i>Tareas</i> .....	99
9.3.	<i>Diagrama de Gantt/Cronograma</i> .....	102
<b>10.</b>	<b>DESCARGO DE GASTOS .....</b>	<b>103</b>
10.1.	<i>Coste de recursos humanos</i> .....	103
10.2.	<i>Coste de Amortizaciones</i> .....	104
10.3.	<i>Coste de recursos materiales y servicios</i> .....	105
10.4.	<i>Costes indirectos</i> .....	105
10.5.	<i>Presupuesto final</i> .....	106

---



<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>12.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>110</b>
<b>13.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>115</b>
13.1.	<i>ANEXO I: Planos, esquemas, cálculos y diseños detalle .....</i>	<i>115</i>

### III. LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 4.1:</b> COMPARACIÓN DE ALGUNAS DE LAS PROPIEDADES ENTRE EL ALUMINIO Y EL ACERO 371 .....	27
<b>TABLA 5.1:</b> COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AA6082 T4 Y AA7075 T6 FACILITADAS POR ALUSTOCK S.A. ...	33
<b>TABLA 5.2:</b> PROPIEDADES MECÁNICAS, FÍSICAS, TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS DE LAS AA6082 T4 Y AA7075 T6 FACILITADAS POR ALUSTOCK S.A. ....	33
<b>TABLA 5.3:</b> TEMPERATURAS Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE SHT PARA LAS AA6082 T4 Y AA7075 T6 SEGÚN LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....	39
<b>TABLA 5.4:</b> DEFINICIÓN DE DISTINTOS TRATAMIENTOS DE ENDURECIMIENTO QUE SE LES APLICA COMÚNMENTE A LAS AA Y OTRAS MUCHAS ALEACIONES METÁLICAS.....	43
<b>TABLA 5.5:</b> TEMPERATURAS Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE SHT Y DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL PARA LAS AA6082 T4 Y AA7075 T6 SEGÚN LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	44
<b>TABLA 5.6:</b> TEMPERATURAS Y TIEMPOS ÓPTIMOS DE SHT Y DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL PARA LAS AA6082 T4 Y AA7075 T6 SEGÚN LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.....	44
<b>TABLA 5.7:</b> COMPARACIÓN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE EL HOT STAMPING TRADICIONAL, WARM FORMING Y EL CONFORMADO EN ESTADO W-TEMPER. ....	49
<b>TABLA 6.1:</b> RESTRICCIONES ESTABLECIDAS EN EL PROGRAMA CES EDUPACK 2017 PARA LA SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL MATERIAL.....	53
<b>TABLA 7.1:</b> CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS TRES HORNOS EMPLEADOS PARA LOS TT.....	60
<b>TABLA 10.1:</b> PARTIDA DE COSTE DE RECURSOS HUMANOS Y HORAS DE INGENIERÍA .....	103
<b>TABLA 10.2:</b> PARTIDA DE COSTE DE AMORTIZACIONES .....	104
<b>TABLA 10.3:</b> PARTIDA DE COSTE DE RECURSOS MATERIALES .....	105
<b>TABLA 10.4:</b> RESUMEN Y PARTIDA TOTAL DE DESCARGO DE GASTOS .....	106
<b>TABLA 13.1:</b> CALCULO DE LAS TENSIONES Y DEFORMACIONES REALES A PARTIR DE LAS INGENIERILES. ..	119
<b>TABLA 13.2:</b> ÁREA REAL Y TEÓRICA DE LAS PROBETAS PEQUEÑAS DE TRACCIÓN DE 100 MM DE LARGO. 120	
<b>TABLA 13.3:</b> CÁLCULO DE LA FUERZA EJERCIDA POR LA PRENSA PARA ALCANZAR LA PRESIÓN REQUERIDA PARA EL TEMPLE. ....	120



## IV. LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>FIGURA 2.1:</b> AVIÓN MILITAR DE EUROFIGHTER CONTORSIUM CON DIVERSOS COMPONENTES COMO FIBRA DE CARBONO, TITANIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO.....	<b>21</b>
<b>FIGURA 2.2:</b> COMPONENTES ESTRUCTURALES LIGEROS DE ALUMINIO Y MAGNESIO DEL CHASIS DEL AUDI R8, UNO DE LOS COCHES SÚPER DEPORTIVOS DE MAYOR GAMA DEL MERCADO. ....	<b>22</b>
<b>FIGURA 2.3:</b> PREVISIÓN DEL CONSUMO DE ALUMINIO EN LA AUTOMOCIÓN. ....	<b>23</b>
<b>FIGURA 4.1:</b> TENDENCIA DEL ARTE EN LA REDUCCIÓN DE PESO MEDIO DE LOS COCHES GRACIAS AL ALUMINIO, CON UNA REDUCCIÓN DE HASTA EL 36 %. ....	<b>26</b>
<b>FIGURA 4.2:</b> LA LEGISLACIÓN EN LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO <sub>2</sub> ES LA PRINCIPAL FUERZA MOTRIZ DE LA REDUCCIÓN DE PESO.....	<b>29</b>
<b>FIGURA 5.1:</b> CLASIFICACIÓN DE LAS DISTINTAS FAMILIAS DE AA PARA FORJA SEGÚN SUS PRINCIPALES CONSTITUYENTES.....	<b>32</b>
<b>FIGURA 5.2:</b> BLOQUE MOTOR DE UN CHEVROLET CORVETTE V8 ENTERAMENTE FABRICADO EN ALUMINIO.....	<b>34</b>
<b>FIGURA 5.3:</b> CARROCERÍA EXTERIOR Y CHASIS DEL NUEVO AUDI A8 2018 FABRICADO PRÁCTICAMENTE EN SU TOTALIDAD DE AAAR.....	<b>36</b>
<b>FIGURA 5.4:</b> CAMBIO DE LA MICROESTRUCTURA DE UNA AA DURANTE EL SHT Y EL ENVEJECIMIENTO .....	<b>38</b>
<b>FIGURA 5.5:</b> TEMPLE EN AGUA DE DISTINTAS ESPADAS Y ARMAS DE ACERO EN ANTIGUAS HERRERÍAS TRADICIONALES. ....	<b>41</b>
<b>FIGURA 5.6:</b> ESQUEMA DE LOS DIFERENTES PUESTOS DE TRABAJO PARA EL PROCESO DE HOT STAMPING/FORMING .....	<b>46</b>
<b>FIGURA 5.7:</b> ESQUEMA DE LOS DIFERENTES PUESTOS DE TRABAJO PARA EL PROCESO DE WARM FORMING.....	<b>47</b>
<b>FIGURA 5.8:</b> ESQUEMA DE LOS DIFERENTES PUESTOS DE TRABAJO PARA EL PROCESO CONFORMADO EN ESTADO W-TEMPER. ....	<b>48</b>

<b>FIGURA 6.1:</b> COMPONENTES ESTÉTICOS INTERNOS DE FIBRA DE CARBONO INSTALADOS EN UN BMW F82 M4.....	51
<b>FIGURA 6.2:</b> ESQUEMA DEL PROCESO DE ESTAMPACIÓN EN CALIENTE PARA PIEZAS ESTRUCTURALES DE VEHÍCULOS. ....	55
<b>FIGURA 6.3:</b> ESQUEMA DEL PROCESO DE ESTAMPACIÓN EN FRÍO PARA PIEZAS ESTRUCTURALES DE VEHÍCULOS. ....	56
<b>FIGURA 6.4:</b> ANTIGUA SECUENCIA FOTOGRÁFICA MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO TIXOTRÓPICO DE UNA AA EN ESTADO SEMI-SÓLIDO. ....	57
<b>FIGURA 7.1:</b> CENTRO DE MECANIZADO LAGUN FE05 L1000 CON CNC DE LA MGEP. ....	59
<b>FIGURA 7.2:</b> INDENTACIÓN O SURCO CARACTERÍSTICO DE FORMA RÓMBICA REALIZADO CON EL DURÓMETRO SOBRE LA SUPERFICIE PULIDA DE AA. ....	61
<b>FIGURA 7.3:</b> MAQUINA DE TRACCIÓN UNIVERSAL DE ZWICK ROELL DE 5 TONELADAS DE FUERZA DE LA MGEP. ....	62
<b>FIGURA 7.4:</b> MICROSCOPIO NOVA NANOSEM 450 DE LA MGEP. ....	63
<b>FIGURA 7.5:</b> PENETRACIÓN DE LOS ELECTRONES DENTRO DE LA MUESTRA DURANTE UN ESTUDIO DE MICROGRAFÍA CON EL SEM. ....	64
<b>FIGURA 7.6:</b> MUESTRAS DE AA7075 Y AA6082 PULIDAS CON UN ACABADO ESPEJO ENGASTADAS EN RESINA NEGRA TERMO-ENDURECIDA. ....	64
<b>FIGURA 7.7:</b> DSC STA 449 F3 DE JUPITER DE LA MGEP ( $T^a = -150^{\circ}\text{C} / 2400^{\circ}\text{C}$ ) ....	65
<b>FIGURA 8.1:</b> IMAGEN SEM DE LA AA6082 T4 A 2.000 AUMENTOS.....	69
<b>FIGURA 8.2:</b> IMAGEN SEM DE LA AA6082 T4 A 8.000 AUMENTOS.....	70
<b>FIGURA 8.3:</b> IMAGEN SEM DE LA AA7075 T6 A 15.000 AUMENTOS.....	72
<b>FIGURA 9.1:</b> DIAGRAMA DE GANTT O CRONOGRAMA DEL PROYECTO .....	102
<b>FIGURA 13.1:</b> CIZALLA HIDRÁULICA NARGESA C-2006 CON CNC DE LA MGEP. ....	116
<b>FIGURA 13.2:</b> DISEÑO Y MEDIDAS NORMALIZADAS DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN	116
<b>FIGURA 13.3:</b> PROBETAS DE 200 Y 100 MM DE LARGURA DE AA7075 Y AA6082, FRACTURADAS DÚCTILMENTE Y SIN FRACTURAR. ....	117
<b>FIGURA 13.4:</b> HORNO ELÉCTRICO NABERTHERM N250/84HA CON VENTILADOR DE LA MGEP. ....	117



---

<b>FIGURA 13.5:</b> HORNO ELÉCTRICO NABERTHERM LH60/14 SIN VENTILADOR DE LA MGEP.....	<b>118</b>
<b>FIGURA 13.6:</b> HORNO ELÉCTRICO J.P. SELECTA S.A CON VENTILADOR DE LA MGEP. ....	<b>118</b>
<b>FIGURA 13.7:</b> DURÓMETRO ZHV10 VICKERS DE ZWICK ROELL EN LA MGEP.....	<b>119</b>
<b>FIGURA 13.8:</b> CÁLCULO DEL ÁREA AMARILLA MEDIANTE FÓRMULA MATEMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DE LAS PROBETAS .....	<b>120</b>
<b>FIGURA 13.9:</b> TERMOPARES DE 1 MM DE DIÁMETRO DE TIPO “K” EMPLEADOS PARA MEDIR LOS PERFILES DE TEMPERATURA .....	<b>121</b>
<b>FIGURA 13.10:</b> IMAGEN SEM A 1.500 AUMENTOS CON AGLOMERACIÓN DE CLÚSTER ROTOS POR EL PROCESO DE LAMINACIÓN EN LA AA6082 .....	<b>122</b>
<b>FIGURA 13.11:</b> IMAGEN SEM A 2.000 AUMENTOS CON AGLOMERACIÓN DE CLÚSTER ROTOS POR EL PROCESO DE LAMINACIÓN EN LA AA7075 .....	<b>122</b>

## V. LISTA DE GRÁFICAS

<b>GRÁFICA 5.1:</b> <i>DIAGRAMA CCT O CURVA “C” CORRESPONDIENTE A UNA AA6060 DE (AL-MG-SI) PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO MÍNIMA.</i> .....	<b>40</b>
<b>GRÁFICA 5.2:</b> <i>DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE TIEMPO-TEMPERATURA PARA EL HOT STAMPING/FORMING EN PIEZAS DE AA7XXX</i> .....	<b>45</b>
<b>GRÁFICA 5.3:</b> <i>DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE TIEMPO-TEMPERATURA PARA EL WARM FORMING</i> .....	<b>47</b>
<b>GRÁFICA 5.4:</b> <i>DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE TIEMPO-TEMPERATURA PARA EL CONFORMADO EN ESTADO W-TEMPER</i> .....	<b>48</b>
<b>GRÁFICA 6.1:</b> <i>GRÁFICA TENSIÓN-DEFORMACIÓN CON DISTINTAS RELACIONES DE RESISTENCIA/DEFORMACIÓN DE ACEROS DP.</i> .....	<b>52</b>
<b>GRÁFICA 6.2:</b> <i>GRÁFICA DE COMPROMISO ENTRE LA TENACIDAD Y LA DENSIDAD CON EL SOFTWARE CES EDUPACK 2017.</i> .....	<b>54</b>
<b>GRÁFICA 8.1:</b> <i>ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA AA6082 T4 EN ESTADO DE COMPRA</i> .....	<b>68</b>
<b>GRÁFICA 8.2:</b> <i>ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA AA7075 T6 EN ESTADO DE COMPRA</i> .....	<b>68</b>
<b>GRÁFICA 8.3:</b> <i>ESPECTRO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PRECIPITADOS DE LA AA6082 T4.</i> .....	<b>71</b>
<b>GRÁFICA 8.4:</b> <i>ESPECTRO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PRECIPITADOS DE LA AA6075 T6.</i> .....	<b>72</b>
<b>GRÁFICA 8.5:</b> <i>ENSAYO EN EL DSC DE LA AA6082 T4.</i> .....	<b>73</b>
<b>GRÁFICA 8.6:</b> <i>ENSAYO EN EL DSC DE LA AA7075 T4.</i> .....	<b>74</b>
<b>GRÁFICA 8.7 (IZQ) Y GRÁFICA 8.8 (DER):</b> <i>COMPARACIÓN DE PERFILES TÉRMICOS EN HORNO CON Y SIN VENTILADOR DE LAS AA6082 T4 (IZQ) Y AA7075 T6 (DER)</i> .....	<b>75</b>
<b>GRÁFICA 8.9:</b> <i>TIEMPOS PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA SHT CON DISTINTOS GROSORES EN AA6082 T4 Y AA7075 T6.</i> .....	<b>76</b>
<b>GRÁFICA 8.10 (IZQ.) Y GRÁFICA 8.11 (DER.):</b> <i>DUREZAS-VICKERS DESPUÉS DE DISTINTOS TIEMPOS DE SHT EN LAS AA6082 (IZQ.) Y AA7075 (DER.)</i> .....	<b>77</b>
<b>GRÁFICA 8.12:</b> <i>AUMENTO DE LA DUREZA DURANTE 1H EN EL ESTADO W-TEMPER POR ENVEJECIMIENTO NATURAL EN LA AA6082.</i> .....	<b>79</b>



---

<b>GRÁFICA 8.13:</b> AUMENTO DE LA DUREZA DURANTE 52 DÍAS EN EL ESTADO W-TEMPER POR ENVEJECIMIENTO NATURAL EN LA AA6082. ....	79
<b>GRÁFICA 8.14:</b> AUMENTO DE LA DUREZA DURANTE 1 H EN EL ESTADO W-TEMPER POR ENVEJECIMIENTO NATURAL EN LA AA7075. ....	80
<b>GRÁFICA 8.15:</b> EFECTO DE LOS CON DISTINTOS TIEMPOS DE SHT, CON Y SIN T4, EN LA RESISTENCIA DE LAS AA6082. ....	81
<b>GRÁFICA 8.16:</b> EFECTO DE LOS CON DISTINTOS TIEMPOS DE SHT, CON Y SIN T4, EN LA RESISTENCIA DE LAS AA7075. ....	81
<b>GRÁFICA 8.17:</b> AUMENTO DE LA DUREZA DURANTE 1H Y 30 MINUTOS POR ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A 190 °C EN LA AA6082. ....	82
<b>GRÁFICA 8.18:</b> DISMINUCIÓN DE LA DUREZA DURANTE 80 H POR SOBRE-ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A 190 °C EN LA AA6082. ....	83
<b>GRÁFICA 8.19:</b> EFECTO DE LOS DISTINTOS TIEMPOS DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A 190 °C EN LA RESISTENCIA DE LAS AA6082. ....	84
<b>GRÁFICA 8.20:</b> EFECTO DE LOS DISTINTOS TIEMPOS DE SHT A 480 °C Y ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A 120 °C EN LA DUREZA DE LAS AA7075. ....	84
<b>GRÁFICA 8.21:</b> MEJORA DE LA RESISTENCIA DE LAS AA7075 RESPECTO AL ESTADO DE COMPRA GRACIAS A LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS TT. ....	85
<b>GRÁFICA 8.22:</b> EFECTO DE LOS DISTINTOS TIEMPOS DE SHT A 550 °C EN LA RESISTENCIA DE LAS AA6082 T6.....	.86
<b>GRÁFICA 8.23:</b> EFECTO DE LOS DISTINTOS TIEMPOS DE SHT A 480 °C EN LA RESISTENCIA DE LAS AA7075 T6.....	86
<b>GRÁFICA 8.24:</b> EFECTO COMBINADO DEL ALMACENAJE EN ESTADO W-TEMPER Y ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL EN LA RESISTENCIA DE LAS AA6082 Y AA7075. ....	87
<b>GRÁFICA 8.25:</b> PERFIL DE ENFRIAMIENTO EN AIRE DE LAS AA. ....	88
<b>GRÁFICA 8.26:</b> PERFIL DE ENFRIAMIENTO EN AGUA DE LAS AA. ....	89

---



---

<b>GRÁFICA 8.27: PERFIL DE ENFRIAMIENTO EN PRENSA DE LAS AA A DISTINTAS PRESIONES (1, 4 Y 10 MPA)</b> .....	<b>91</b>
<b>GRÁFICA 8.28 (IZQ) Y GRÁFICA 8.29 (DER): EFECTO DE LOS DISTINTOS TIEMPOS DE SHT E INFLUENCIA DEL TEMPLE EN PRENSA A DISTINTAS PRESIONES DE LAS AA7075.</b> .....	<b>92</b>
<b>GRÁFICA 8.30 (IZQ) Y GRÁFICA 8.31 (DER): EFECTO DE LOS DISTINTOS TIEMPOS DE SHT E INFLUENCIA DEL TEMPLE EN PRENSA A DISTINTAS PRESIONES DE LAS AA6082.</b> .....	<b>93</b>
<b>GRÁFICA 8.32: EFECTO DEL CONFORMADO EN ESTADO W-TEMPER DE LAS AA6082.</b> .....	<b>94</b>
<b>GRÁFICA 8.33: EFECTO DEL CONFORMADO EN ESTADO W-TEMPER DE LAS AA7075.</b> .....	<b>95</b>
<b>GRÁFICA 8.34: EFECTO DE DISTINTOS TIEMPOS DE SHT Y LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN EL ESTADO W-TEMPER EN LAS AA7075.</b> .....	<b>97</b>
<b>GRÁFICA 13.1: POTENCIAL DE LA REDUCCIÓN DE PESO DE VARIOS MATERIALES</b> .....	<b>115</b>
<b>GRÁFICA 13.2: COMPONENTES FABRICADOS POR HOT STAMPING</b> .....	<b>115</b>
<b>GRÁFICA 13.3: CURVAS FUERZA-TIEMPO EJERCIDAS POR LA PRENSA PARA TEMPLAR LAS PIEZAS A DISTINTAS PRESIONES Y EL TIEMPO EN ALCANZAR DICHA FUERZA.</b> .....	<b>121</b>

## VI. NOMENCLATURA

### Acrónimos

<b>MGEP</b> .....	Escuela Polit. Superior de Mondragón ( <i>MGEP, Mondragon Goi Eskola Politeknikoa</i> )
<b>MU</b> .....	Universidad de Mondragón ( <i>Mondragon Unibertsitatea</i> )
<b>FA</b> .....	Fagor Arrasate S. Coop.
<b>AA</b> .....	Aleación de Aluminio
<b>AAAR</b> .....	Aleación de Aluminio de Alta Resistencia
<b>TT</b> .....	Tratamiento Térmico
<b>SHT</b> .....	Tratamiento Térmico de Solución ( <i>Solution Heat Treatment</i> )
<b>DSC</b> .....	Calorimetría diferencial de barrido ( <i>Differential Scanning Calorimetry</i> )
<b>AHSS</b> .....	Aceros Avanzados de Alta Resistencia ( <i>Advanced High-Strength Steel</i> )
<b>T4</b> .....	Tratamiento Térmico de envejecimiento Natural
<b>T6</b> .....	Tratamiento Térmico de envejecimiento Artificial
<b>UTS</b> .....	Tensión última de rotura ( <i>Ultimate Tensile Stress</i> )
<b>A50</b> .....	Elongación máxima de rotura (distancia extensómetro = 50 mm)
<b>SSSS</b> .....	Solución Sólida Súper Saturada o W-temper
<b>TTT</b> .....	Transformación en Enfriamiento Continuo ( <i>CCT, Continuous Cooling Transformation</i> )
<b>DP</b> .....	Aceros de Fase Dual ( <i>Dual phase</i> )
<b>CP</b> .....	Aceros de Fase Compleja ( <i>Complex phase</i> )
<b>SSM</b> .....	Conformado de Metales en Estado Semi-sólido ( <i>SSM, Semi-Solid Metal forming</i> )
<b>SEM</b> .....	Microscopio Electrónico de Barrido ( <i>SEM, Scanning Electron Microscope</i> )
<b>CNC</b> .....	Control Numérico por Computadora ( <i>CNC, Computer Numerical Control</i> )



## Símbolos

$E$	.....	Módulo de Young
$G$	.....	Módulo de Cizalladura
$\nu$	.....	Coefficiente de Poisson
$C_p$	.....	Capacidad Calorífica Específica
$T_f$	.....	Temperatura de Fusión
$\alpha$	.....	Difusividad térmica
$\rho$	.....	Densidad
$\rho_{el}$	.....	Resistividad eléctrica
$\lambda$	.....	Coefficiente de Conductividad Térmica
$\sigma_y (0.2)$	.....	Tensión de fluencia (deformación = 0,2 %)
$Al$	.....	Aluminio
$O$	.....	Oxígeno
$C$	.....	Carbono
$Cu$	.....	Cobre
$Mn$	.....	Manganeso
$Si$	.....	Silicio
$Mg$	.....	Magnesio
$Zn$	.....	Zinc
$Li$	.....	Litio
$Fe$	.....	Hierro
$Cr$	.....	Cromo
$Ti$	.....	Titanio
$Zr$	.....	Zirconio
$Ni$	.....	Nitrogeno
$Ar$	.....	Argón



# 1. INTRODUCCIÓN

El siguiente documento contiene la explicación del Trabajo de Fin de Master denominado “Desarrollo, mejora y optimización de procesos de *Hot Stamping* para el aligeramiento de piezas estructurales de aleaciones de aluminio de alta resistencia”.

Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto nacional denominado “*BEROALU*” en el que participan la Escuela Politécnica Superior de Mondragón (MGEP, Mondragon Goi Eskola Politeknikoa) dentro de la Universidad de Mondragón (MU, Mondragon Unibertsitatea), junto con el apoyo y la financiación económica de Fagor Arrasate S. Coop. (FA). Muchos de los resultados aquí expuestos serán presentados en la XV edición del Congreso Nacional de Materiales 2018 (CNMAT2018) en Salamanca. De hecho, este trabajo será la base para una futura Tesis Doctoral por parte del mismo autor de este trabajo, y así, favorecer una correcta continuidad en el estudio y nuevas investigaciones de los materiales ligeros y resistentes en la MGEP.

En un principio se presentará el contexto del trabajo de fin de master, destacando la importancia de la implementación de piezas estructurales más ligeras en vehículos para el sector de la automoción y el de la aeronáutica con el fin de reducir el combustible y las emisiones perjudiciales. Tras ello, se definirán el objetivo y alcance de dicho trabajo, seguido de los beneficios técnicos o científicos, económicos, sociales y medioambientales que se esperan obtener con dicha reducción de emisiones.

A continuación, se profundizará en el estado del arte, explicando brevemente los conocimientos previos requeridos para la correcta comprensión de este trabajo. Para ello, primero se hará una breve introducción a las aleaciones de aluminio de alta resistencia (AAAR), sus comienzos, historia, evolución a lo largo de los años y aplicaciones actuales, así como los tipos de aleaciones de aluminio (AA) más empleadas y sus múltiples propiedades que las hacen tan característicos.

Para continuar con el estado del arte, se procederá a dar paso a las explicaciones concernientes a los tratamientos térmicos (TT) a los que son sometidas las AA en este trabajo, desde el funcionamiento y los tipos de hornos empleados, hasta los tratamientos de solución y envejecimiento. Además, se resumirán los distintos métodos de temple y las principales diferencias del envejecimiento natural y el envejecimiento artificial. El estado del arte finaliza con una breve explicación y justificación de los procesos de estampación en caliente más empleados: la estampación en caliente tradicional o internacionalmente conocido como *Hot Stamping*, el *Warm forming* y el *W-temper*.

También se analizarán las alternativas existentes que se podrían llevar a cabo en lugar de este proyecto, como otras opciones de conformado en caliente y en frío, o el uso de otro tipo de materiales más resistentes o más ligeros. Se argumentará el porqué de las decisiones tanto a la hora de seleccionar dichas aleaciones metálicas como a la hora de estudiar los procesos de conformado antes mencionados. Y por supuesto, antes de dar paso al desarrollo de la metodología, se hará un pequeño resumen de los equipos y procedimientos necesarios para llevar a cabo los experimentos.

Una vez hecho esto, se procederá a explicar cada uno de los pasos y metodología a seguir para la correcta realización de este proyecto, además de una breve explicación de sus componentes básicos. La metodología destaca por tener tres etapas principales, una en la que se realiza la caracterización del material a estudiar en estado de compra, otra en la que se lleva a cabo la mejora y optimización del TT, y una tercera en la que se estudia el propio proceso de conformado y la influencia de la deformación y la velocidad de deformación de la pieza.

En cuanto el desarrollo de la parte técnica del trabajo haya finalizado se procederá a enumerar y describir cada una de las tareas a desarrollar durante el trabajo en cuestión, así como el equipo de trabajo e investigación que han ayudado de forma directa o indirecta con el proceso de este proyecto. Se incluye, por tanto, un cronograma o diagrama de Gantt que recoge dicha información y la muestra de forma intuitiva y fácil de visualizar.

Este Trabajo de Fin de Master, además, cuenta también con un descargo y desglose de gastos económicos a grandes rasgos, así como un presupuesto final del trabajo, seguido de un análisis exhaustivo de riesgos. En este último se enumerarán y clasificarán los principales riesgos económicos y técnicos, dando una detallada explicación de las consecuencias de los mismos y posibles acciones a realizar para evitarlos, o por lo menos, conseguir que sus consecuencias no supongan una gran pérdida en el proyecto, minimizando así los posibles gastos adicionales. Para una mejor perspectiva de dichos riesgos, se clasificarán de una manera ordenada mediante la matriz de probabilidad e impacto.

Además, se hará una breve explicación con las conclusiones más importantes sacadas sobre los resultados de este trabajo y sus consecuencias en el ámbito de la investigación directa en la industria de la aeronáutica y automoción. Como ocurre en la mayoría de las investigaciones, los estudios realizados hasta el momento abren a su paso nuevas líneas de investigación y futuro desarrollo, en los que se explicarán y detallarán una posible continuidad en la propia Universidad.

Por último, se procederán a detallar los anexos de este trabajo, en los que se incluirán gráficas, imágenes, cálculos y mucha más información que puede llegar a ser útil, pero no imprescindible, para la correcta comprensión de este trabajo. Dicha información puede servir



para complementar los conocimientos adquiridos durante este trabajo y para indagar aún más en las entrañas del proyecto denominado “Desarrollo, mejora y optimización de procesos de *Hot Stamping* para el aligeramiento de piezas estructurales de aleaciones de aluminio de alta resistencia”.

## 2. CONTEXTO

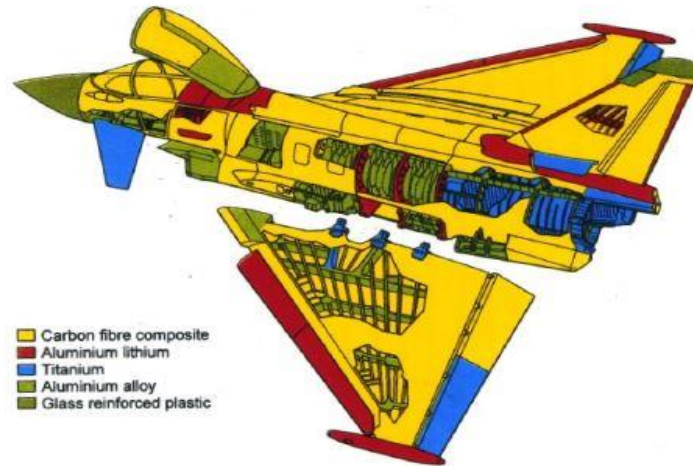
En los últimos años los avances tecnológicos están ocurriendo a una velocidad vertiginosa, estos avances requieren cada vez más del uso de unos materiales más avanzados y específicos. Es por eso que éstos han venido de la mano de diversas técnicas, logrando el conocimiento y desarrollo de nuevas aleaciones y la modificación de la microestructura de las mismas, obteniendo materiales con formas más complejas mediante la estampación en caliente, el desarrollo de nuevos tratamientos térmicos e incluso dando lugar al novedoso mundo de las aleaciones súper ligeras.

En general se conocen como aleaciones ligeras todas aquellas mezclas de metales y minerales cuya densidad es inferior a la del acero ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ), pero comparables con su dureza. Las AAAR son aleaciones de este tipo dada su baja densidad ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ), una densidad casi tres veces inferior que la del acero y con unas propiedades mecánicas envidiables por otras muchas aleaciones. Aunque es verdad que no alcanzan las mismas prestaciones mecánicas que las estructuras de acero, el aluminio aleado con cobre, zinc, manganeso, magnesio o silicio entre otros muchos elementos, es dotado de unas excelentes características en cuanto a relación resistencia/peso se refiere, lo que las hacen aptas para el uso en componentes estructurales aeronáuticos.

En cuanto a los materiales empleados en el sector de la aviación, históricamente se comenzó con la madera. Debido a su morfología en capas y anisotropía, puede considerarse un material natural compuesto. Sin embargo, las estructuras de madera sufren cambios en su geometría y pérdida de propiedades debidos a la humedad y a los ataques biológicos. Por lo que a partir de la primera guerra mundial algunos fabricantes empezaron a usar más el acero. El problema del mismo reside en su alta densidad y problemas de corrosión entre otros. Debían prestar especial atención a la corrosión galvánica que sufrían en contacto con aleaciones de aluminio. Aun así, en la actualidad ciertos componentes como el tren de aterrizaje, bancados de motor o herrajes siguen siendo fabricados en acero. Sus ventajas residen en la alta resistencia y bajo precio. A partir de la aparición de nuevos métodos de conformado, los cuales abaratan el coste del aluminio, que era considerado como un metal semiprecioso anteriormente, se empiezan a plantear su utilización como duraluminio (aluminios de la serie 2xxx) debido a su baja densidad, facilidad de procesado y a una mayor resistencia al ser aleado.

De modo que debido a su buena resistencia y relación peso/coste el aluminio comenzó a ser el rey de las aleaciones en la construcción de aviones (Figura 2.1), a pesar que en los últimos años se hayan aplicado algunas nuevas aleaciones como las de la serie 8xxx. Pese a que a temperaturas altas ( $200\text{-}250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) las AA tienden a perder su resistencia, se vuelven más resistentes a bajo cero aumentando su ductilidad, lo que hace del aluminio una aleación

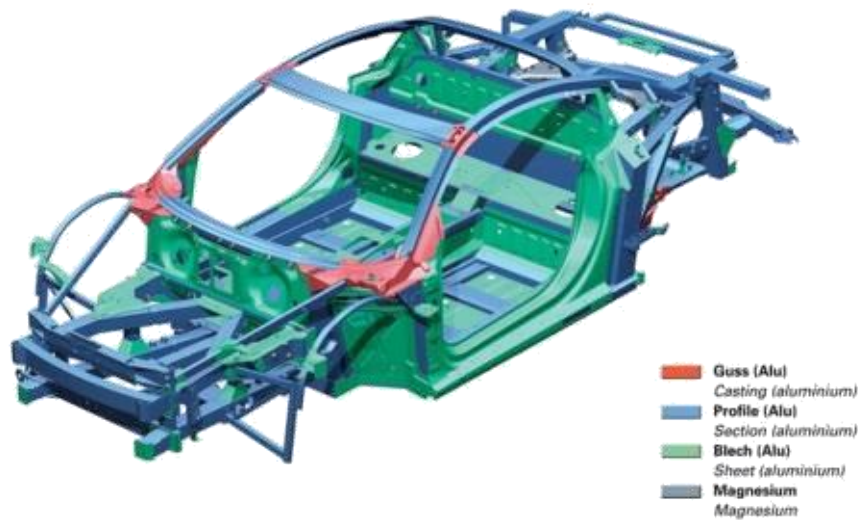
extremadamente útil para aplicaciones criogénicas. En aviones de altos vuelos es común volar a  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que se benefician de dicha propiedad.



**Figura 2.1:** *Avión militar de Eurofighter con diversos componentes como fibra de carbono, titanio y aleaciones de aluminio.*

Hasta hace muy poco el aluminio parecía un material confinado únicamente a la aeronáutica, y en el caso de los autos, restringido a interiores o accesorios menores. La posibilidad de construir un automóvil cien por cien de aluminio y de alto rendimiento era una idea osada y poco probable en la industria automotriz. Sin embargo, una serie de pioneros comenzaron a experimentar con estas aleaciones a partir de la década de los 90, justo en el momento en que empezó a ser posible y rentable su producción a gran escala. Desde mediados de esa década se produjeron AA reforzado con otros elementos que se integraron a la aeronáutica, la navegación e incluso a las bicicletas. El resultado fueron las AA ligeras y de alta resistencia de las series 6xxx, 7xxx y 8xxx que produjeron una verdadera revolución en los materiales para el transporte. Desde entonces muchos automóviles entraron en la edad del aluminio, no sólo en su carrocería, donde ofrecen prestaciones únicas, sino también en los motores, que avanzan en su desempeño, e incluso en el chasis, con ventajas que muchos ingenieros consideran cruciales sobre el acero.

En el año 1999 se presentó en el salón de Frankfurt una exhibición sobre prometedores desarrollos del aluminio, como es el caso del Audi A8 o el Audi R8 realizados con la tecnología *SpaceFrame* (, y más tarde aplicada a coches de menor gama como el Audi A2. Esta nueva tecnología también está siendo usada por Mercedes (SRL), BMW (Z8) y Fiat (Múltipla). Otros ejemplos son: Honda NSX, Ferrari 360 Modena, BMW Z8... Todos estos modelos, aunque disponen de una tecnología superior, se basan en el modelo del Aston Martin V8, el cual usa una carrocería formada por paneles de aluminio unidos a una estructura de acero.



**Figura 2.2:** Componentes estructurales ligeros de aluminio y magnesio del chasis del Audi R8, uno de los coches súper deportivos de mayor gama del mercado.

Otros segmentos de la industria de la automoción, formado por camiones, trenes, autobuses, aviones y barcos, también continúan con el desarrollo de la utilización de las AAAR. En el caso de los camiones, la cantidad de aluminio que se utiliza en estos momentos en su fabricación es de 135.000 toneladas y se estima que en el futuro llegará a ser de 350.000. Si tenemos en cuenta que el aluminio puede llegar a reducir el peso de algunos componentes que forman parte del camión en un 60% y que la mayoría de los productos de Europa son transportados por carretera, podemos darnos cuenta del alcance que puede tener el uso del aluminio en la eficiencia del consumo de combustible.

Los esfuerzos para aligerar el peso de los vehículos han aumentado gracias a la presión económica y política para reducir el consumo de combustible y, por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. No obstante, la masa media de los automóviles muestra una tendencia creciente debido fundamentalmente al uso de más equipamiento de confort y seguridad, y a la demanda de coches cada vez más grandes y robustos. Esto a su vez ha provocado un aumento de peso en otra serie de componentes como por ejemplo motores, transmisiones, frenos etc... con el objetivo de alcanzar el rendimiento necesario. Así, la inversión de la llamada “espiral del peso” es hoy uno de los mayores retos para la industria de la automoción. Un estudio publicado por *Ducker Worldwide* en cooperación con la *European Aluminum Association* dice que la cantidad de aluminio utilizado por coches producidos en Europa casi se triplicó entre 1990 y 2012, pasando de 50 Kg a 140 Kg. Esta cantidad está prevista que aumente a unos 220 Kg o incluso a 250 Kg (550 libras) en 2020 si los mercados de coche siguen la evolución registrada hasta ahora (Figura 2.3). La parte más pesada de un coche es la carrocería (hasta un 30% del peso total, en función de las características del vehículo, el tamaño del motor y las características de seguridad y confort instaladas). La reducción de peso

de la carrocería mediante el uso de AAAR es una gran oportunidad para el sector, y en Europa ya se lleva tiempo trabajando en esta dirección.

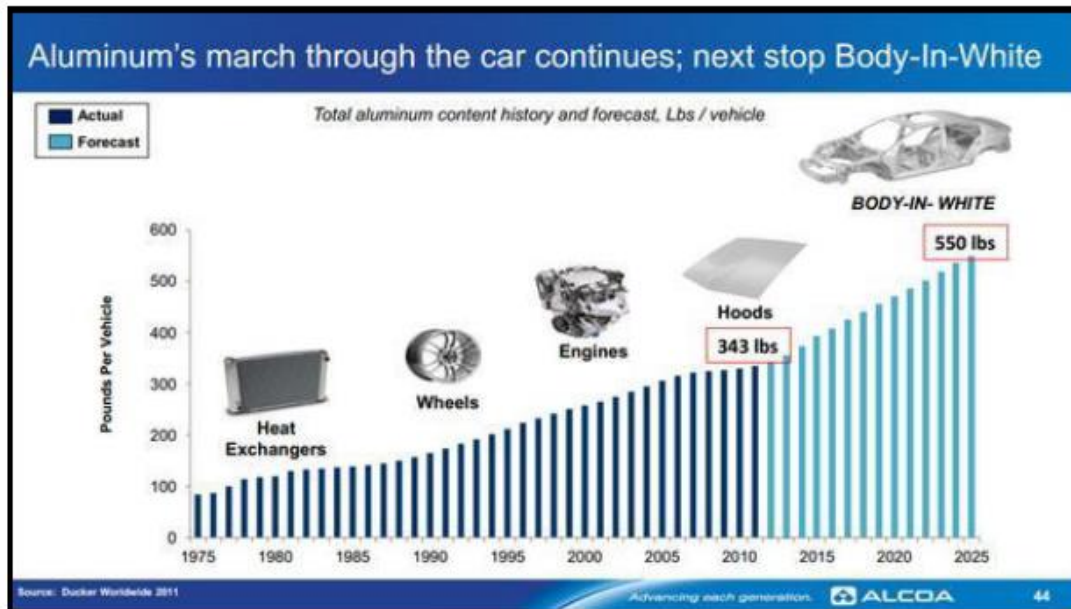


Figura 2.3: Previsión del consumo de Aluminio en la automoción.

### 3. OBJETIVOS Y ALCANCE

Ya que el objetivo principal de este trabajo es caracterizar AAAR y optimizar tanto los TT como los procesos de estampación en caliente existentes para el aligeramiento de piezas estructurales en automoción y aeronáutica, lo primero de todo conviene documentarse e informarse adecuadamente sobre los temas a tratar, como son las propiedades de las AA, TT necesarios y métodos de estampación en caliente. Para ello se han impartido una serie de clases de contacto con la materia a cargo de la instructora de la Empresa (Nagore Otegi) a través de reuniones y charlas durante las horas de prácticas.

Además, se han consultado diferentes fuentes de información bibliográfica a través de internet, artículos científicos y anteriores tesis doctorales académicas facilitadas por la instructora con el fin de conocer suficientemente bien la materia como para empezar a definir el rumbo del proyecto, sabiendo siempre hasta donde se quiere llegar con este trabajo. Es decir, sin el adecuado conocimiento de los tiempos en horno, temperaturas y demás parámetros de los TT y otros procesos, empezar a realizar experimentos sería en vano. Por tanto, es de vital importancia establecer una serie de conocimientos iniciales, a fin de conocer el alcance del proyecto.

El alcance del proyecto es la entrega de una serie de datos, obtenidos con la ayuda de máquinas de laboratorio y ensayos experimentales, que representaran los parámetros óptimos para los procesos de endurecimiento estructural y conformado que se van a realizar en las AA de alta resistencia mecánica. Por tanto, los entregables de este proyecto son una serie de gráficas, tablas e información muy práctica que puede que resulte útil en un proceso industrial o sean una nueva dirección cara a una futura tesis doctoral.



## 4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

La correcta realización de este trabajo tiene un valor potencial elevado. El estudio de un aspecto tan crítico como el de la optimización de los tratamientos térmicos de endurecimiento y conformado del aluminio es un factor muy importante que determina las características mecánicas finales de cualquier pieza estructural. Si el trabajo se realiza adecuadamente acarrea una serie de beneficios indudablemente lucrativos para cualquier interesado en el proyecto.

Los beneficios reportados por este proyecto van a ser explicados a continuación y se dividen en cuatro apartados principales: beneficios técnicos o científicos, beneficios económicos, beneficios sociales y beneficios medioambientales.

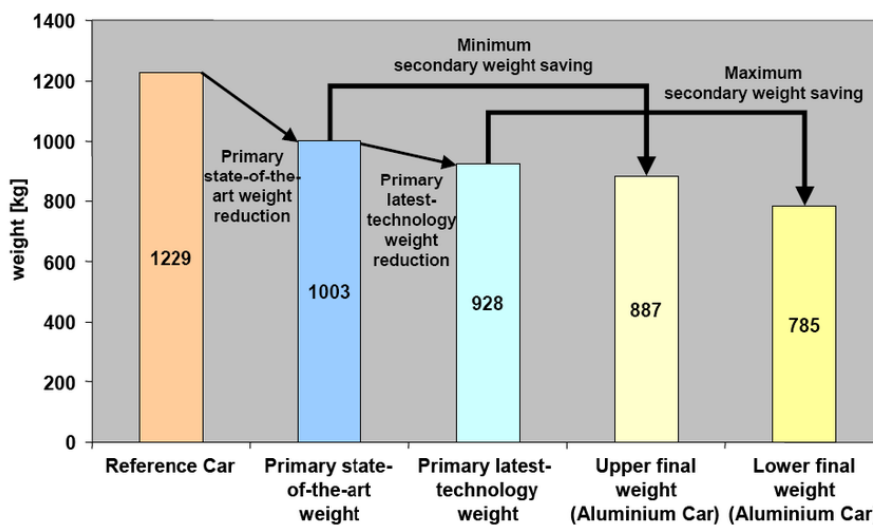
### 4.1. Beneficios científicos / técnicos

Los beneficios científicos y técnicos de este trabajo se basan principalmente en asegurar las propiedades de los distintos materiales y los parámetros de los procesos, además de enriquecer al lector con información lucrativa y prever el comportamiento de los productos en un amplio abanico de situaciones. Estos beneficios acarrearán una serie de ventajas en los aluminios respecto a otros materiales, como los aceros, con los que se compararán sus ventajas y desventajas.

Entre los primeros beneficios técnicos directos del proyecto se pueden destacar el hecho de poder **asegurar el estado de compra de las AA** gracias a la información y caracterización del material en cualquier punto del proceso o **establecer unas temperaturas y tiempos óptimos de los tratamientos térmicos** de solución (SHT, *Solution Heat Treatments*) y de los distintos tipos de tratamientos de envejecimiento. Por supuesto, esta optimización permite calentar las piezas con mayor rapidez y seleccionar el horno adecuado para ello, por lo que la **calidad final de la pieza será mayor** asegurando una **mayor disolución de los precipitados** durante el SHT. Esto a su vez es comprobado gracias al estudio metalográfico y a los ensayos en la máquina de calorimetría diferencial de barrido (DSC, *Differential Scanning Calorimetry*) con los que se puede evaluar la calidad de los materiales y **evitar rechazos de productos defectuosos** en un ámbito industrial.

A la hora de citar más contribuciones técnicas, no se debe olvidar que este proyecto nos facilita **información lucrativa**, como pueden ser los valores de resistencias, durezas o curvas de enfriamiento en aire, agua y prensa para garantizar el temple completo. Además, nos permitirá en un futuro **prever distintos parámetros** como el tiempo de transferencia entre

puestos de trabajo, rapidez de los procesos y evolución de las propiedades tanto dentro como fuera del horno. Este último punto es importante, entre otros, para determinar el tiempo de almacenamiento máximo de las AA justo después del temple. Esto es debido al endurecimiento por envejecimiento natural que sufren estos materiales y que puede afectar negativamente al estado del producto final, y así ahorrar espacio en los almacenes o favorecer una cierta flexibilidad en los procesos de fabricación siempre y cuando su almacenamiento sea asumible durante un largo periodo de tiempo. En cuanto al proceso de conformado de las estructuras de alta resistencia, se podrían **optimizar parámetros tales como la presión y la velocidad de deformación** con el fin de facilitar la estampación.



**Figura 4.1:** *Tendencia del arte en la reducción de peso medio de los coches gracias al aluminio, con una reducción de hasta el 36 %.*

Todos estos beneficios mencionados anteriormente conllevan en sí a una **mejora de las propiedades finales** de los productos que los hacen **competentes en el mercado** actual del sector aeronáutico y automovilístico, ya que aumentando sus propiedades mecánicas sería posible reducir el grosor de estos componentes estructurales y a su vez **aligerar el peso final del vehículo** (Figura 4.1), pudiendo ganar la batalla a las piezas de acero avanzado de alta resistencia (AHSS, *Advanced High-Strength Steel*). En consecuencia, esto hace que las carrocerías de aluminio sean más ligeras que las de acero, con una rigidez a torsión un 40 % más elevada que su equivalente en acero y un 60 % más ligera. En términos de eficiencia estructural, esto hace que las **estructuras de aluminio sean unos 96% más eficientes que las de acero** (Tabla 4.1). Como ejemplo tenemos el coche de época más caro construido, el *Bugatti Royale* (8,7 millones de dólares), que con su estructura de aluminio es capaz de transportar un camión. Debido a este menor peso de la carrocería y que de esta forma el centro de gravedad está más bajo, se **mejora la energía absorbida en los choques, así como las distancias de frenado**.



Propiedad		Aluminio	Acero 371
1	Esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )	250	400
2	Elasticidad E, Módulo de Young (MPa)	70.000	210.000
3	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,7	7,8
4	Punto de fusión (°C)	660	1500
5	Rango de temperatura de trabajo (°C)	-250 a 150	-50 a 500
6	Conductividad eléctrica (m/Ohm mm) <sup>2</sup>	29	7
7	Conductividad térmica (W/m °C)	200	76
8	Coefficiente de expansión lineal x 10 <sup>-6</sup> /°C	24	12
9	No-magnético	Sí	No
10	Tóxico	No	No
11	Resistente a la corrosión	Sí	Sí
12	Mecanizado	Fácil	Fácil
13	Maleable	Sí	Sí

Tabla 4.2: Comparación de algunas de las propiedades entre el aluminio y el acero 371

Además, las aleaciones de aluminio presentan una **mayor resistencia a la corrosión** y la **necesidad de un menor número de piezas**. Esta necesidad de un menor número de piezas compensa la dificultad del aluminio para ser soldado. A pesar de que todavía las estructuras de acero son más empleadas que las de aluminio debido a un menor coste y mayor facilidad de conformado, las AA ligeras y de alta resistencia **suponen un plus tecnológico** del que el acero carece completamente. Se tratan de unas aleaciones ligeras en proceso de desarrollo y que podrían dar más de sí en un futuro no muy lejano abaratando su coste y haciéndolas incluso viables para vehículos de gama baja.

## 4.2. Beneficios económicos

El desarrollo y optimización de los procesos de *Hot Stamping* y caracterización de las aleaciones a trabajar proporcionan una serie de beneficios económicos tanto directos durante el desarrollo en sí, como beneficios indirectos que derivan de los beneficios técnicos descritos anteriormente. Dichos beneficios económicos indirectos influyen en las múltiples aplicaciones en las que son usadas las AAAR.

La **reducción del tiempo de los procesos de Hot Stamping** se podría clasificar como uno de los beneficios económicos directos más importantes, gracias a la adecuada elección de un horno, a la optimización de los tratamientos de solución y envejecimiento en función del grosor de la pieza, a los temple más rápidos tanto en agua como en prensa, a la previsión de los tiempos de transferencia entre puestos de trabajo y gracias a que ahorraremos futuros estudios de

pieza por la caracterización completa ya realizada. Esta reducción de tiempo en el desarrollo del producto abarata los costes de todos los procesos y aumenta la producción significativamente, por lo que **acarrea un ahorro monetario** importante, al cual no se le da el valor que merece. Las horas de ingeniería invertidas en subsanar errores, buscar alternativas de diseño etc.... pueden ser invertidas en otras labores que puedan reportar mayores beneficios, en el desarrollo de nuevas técnicas y diseños con un incalculable futuro provecho.

Todo este ahorro monetario, a su vez, se ve incrementado gracias a que los tiempos en horno y otros procesos son menores, por lo que el **coste energético de estos es menor** y así compensar el inmenso coste de producción primaria que supone la obtención del Aluminio. Además, como bien se ha mencionado anteriormente, este proyecto ofrece la posibilidad de controlar y hacer un seguimiento de los envejecimientos naturales de la pieza, por lo que se podría **ahorrar espacio y optimizar el almacenamiento** de las piezas durante su endurecimiento.

En el apartado económico indirecto cabe destacar el **ahorro de combustible** que suponen los coches equipados con chasis de AA ligeros, ya que la reducción de peso conlleva una menor potencia necesaria y, por lo tanto, un menor consumo de combustible. Como ya se ha citado previamente, el número de piezas para soldar es menor que en el caso del acero, por lo que se **ahorraría en costes de soldadura**, que no son nada baratos, y así poder compensar los costes de una difícil soldadura que acarrea las piezas estructurales de aluminio. Y otra de las mayores ventajas que presentan frente a los aceros, es que las temperaturas de fusión de los aluminios es menos de la mitad que la de los aceros, por lo que los SHT y tratamientos de endurecimiento se ejecutan a una temperatura en horno mucho menor, lo que supone otro **ahorro en el coste energético y en el tiempo de calentamiento de las piezas**.

### 4.3. Beneficios sociales

A pesar de que los **beneficios sociales** de este trabajo no sean tan abundantes y tengan tanta repercusión como los anteriores beneficios, cabe destacar que están fuertemente ligados con la generación de conocimientos en el ámbito universitario e industrial, sobre todo en el sector aeronáutico y automovilístico.

El adecuado desarrollo, mejora y optimización de los procesos de estampación, así como la caracterización para el aligeramiento de piezas estructurales de AAAR, **pueden ser empleados como apoyo o punto de partida para futuros trabajos**, ya sean pequeños proyectos de clase, trabajos de fin de grado o incluso otros trabajos de fin de master. En este caso, dicho estudio **será la base para una futura Tesis Doctoral** por parte del mismo autor de este trabajo, y así, favorecer una correcta continuidad en el estudio y nuevas investigaciones de los materiales

súper ligeros y resistentes para el sector industrial en la *Universidad Superior Politécnica de Mondragón* en colaboración y con ayuda de la financiación de la empresa *Fagor Arrasate S. Coop.*, entre otras. Este trabajo puede a su vez **ser empleado como base de datos**, debido a la gran cantidad de información que recolecta y que puede llegar a ser lucrativo tanto en ámbitos universitarios (para estudiantes, profesores, investigadores) como en ámbitos industriales.

#### 4.4. Beneficios medioambientales

En el anterior apartado se ha mencionado el inmenso ahorro de combustible que podría suponer la correcta implementación de estructuras de AAAR en vehículos terrestres y aéreos. Y no solo en coches y aviones, sino también en camiones de transporte. Como bien se ha mencionado en el contexto, si tenemos en cuenta que el aluminio puede llegar a reducir el peso de algunos componentes que forman parte del camión en un 60 % y que la mayoría de los productos de Europa son transportados por carretera, podemos darnos cuenta del alcance que puede tener el uso del aluminio en la eficiencia del consumo de combustible (Figura 4.2).



**Figura 4.2:** La legislación en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> es la principal fuerza motriz de la reducción de peso.

Gracias a esta reducción de peso y a la demanda de potencia, se podría reducir a su vez el tamaño de la gran mayoría de los componentes mecánicos y de potencia de los vehículos. Esto hace al mismo tiempo, que el aligeramiento total del coche sea aún mayor. Por lo que estamos ante una espiral creciente, por ejemplo: una reducción de peso del 20% en el chasis y los paneles del vehículo conlleva una reducción de peso del 24% en el resto de componentes (Motor, frenos, suspensión...), esto acarrea una disminución del 27% en la potencia del motor y esto último trae consigo un decrecimiento en el consumo de combustible de un 30%. De

modo que la “espiral de reducción de peso”, incrementa el resto de beneficios indirectos obtenidos gracias a dicha reducción de peso.

Como beneficio medioambiental más notable de todos, cabe destacar que esta rebaja en el consumo de combustible conlleva una **reducción increíble en las emisiones contaminantes** de todos y cada uno de los vehículos, sobre todo en los vehículos con motores térmicos de combustión interna. Entre estos contaminantes se encuentran el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos no quemados (HC), compuestos de plomo, anhídrido sulfuroso y partículas sólidas. La producción de energía eléctrica actual en España proviene en gran medida de las centrales nucleares, del carbón, fuel, gas, y de los ciclos combinados. Por lo que los **coches eléctricos también son beneficiados con una reducción en las emisiones contaminantes** gracias a la reducción de peso, una reducción de peso muy necesaria en esta clase de “vehículos ecológicos”, ya que, en un vano intento por aumentar la autonomía de estos, el tamaño de las baterías crece desmesuradamente, y estas no son muy ligeras precisamente.

Cabe destacar como último beneficio medioambiental que **el aluminio puede ser reciclado reiteradamente** sin que pierda sus cualidades. Su elevado valor como chatarra asegura su recuperación y reciclaje: actualmente el 95% del aluminio de los coches se recoge y recicla, teniendo en cuenta que el 50% del valor del material de un coche al final de su vida útil es el aluminio.

## 5. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se procederá a explicar el documento del Estado Del Arte en el que se resumen los conocimientos básicos para la correcta comprensión de este trabajo y todos sus términos, así como situar al lector dentro de la disciplina de la ingeniería en la que se va a trabajar otorgándole una mejor perspectiva del proyecto.

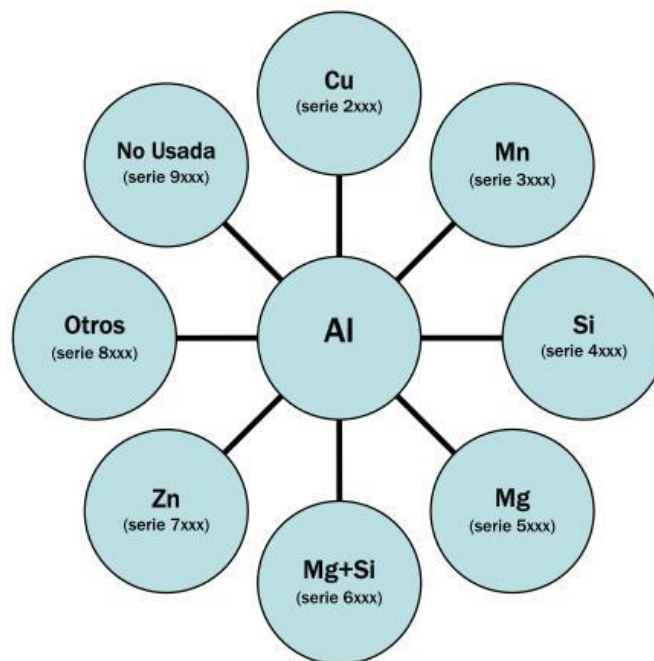
### 5.1. Aleaciones de Aluminio de alta resistencia (AAAR)

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre. Con una densidad de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, tres veces inferior a la del acero, es uno de los metales más ligeros, sólo superado por el litio, sodio, berilio y magnesio. Si a esto se le une su alta conductividad eléctrica y térmica, elevada resistencia a la corrosión, y su facilidad para ser moldeado, el aluminio se convierte en un material especialmente atractivo, no sólo por motivos económicos, sino también por el conjunto de propiedades que presenta. Pese a la abundancia de este metal, su aplicación industrial a gran escala no se inició hasta los años 40 del pasado siglo. A partir de entonces, el consumo mundial de aluminio ha sufrido un fuerte crecimiento, hasta llegar a una producción de 36 millones de toneladas en el año 2002. Todos los indicadores muestran la misma tendencia para los próximos años, esperándose un crecimiento medio anual del 2,9%.

Aunque, en apenas 60 años, el aluminio haya pasado de tener un uso prácticamente testimonial a emplearse con asiduidad, para que la utilización de este material pueda extenderse ampliamente a aplicaciones industriales copadas tradicionalmente por materiales férreos, es necesario mejorar algunas de sus propiedades. Entre ellas se encuentra la resistencia a la tracción, muy por debajo de la proporcionada por aleaciones de base hierro hasta ahora. Uno de los principales avances en este sentido se base en el control microestructural, a través de TT de envejecimiento, aprovechando el cambio de solubilidad en el aluminio de ciertos elementos de aleación, en función de la temperatura.

Las AA son aleaciones obtenidas a partir de aluminio y otros elementos, generalmente cobre, zinc, manganeso, magnesio o silicio (Figura 5.1). Forman parte de las llamadas aleaciones ligeras, con una densidad tan baja como la del aluminio puro, pero no tan resistentes a la corrosión, que tiene una capacidad de autopasivación formando en su superficie una capa de óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alúmina) que la protege de ataques corrosivos exteriores. Las AA tienen como principal objetivo mejorar la dureza y resistencia del aluminio, que en estado puro es un metal muy blando. Como ejemplo de estas aleaciones cabe destacar las de la serie 7xxx (Al-Zn), en las cuales la aparición de precipitados nanométricos de transición son

responsables del endurecimiento del material. Las AA (tanto las forjadas como las moldeadas) se clasifican en función del elemento aleante usado en mayor proporción. Con diferencia, las estructuras ligeras a la vez que resistentes más empleadas son las de las series 2xxx, 6xxx y 7xxx. Estas aleaciones son consideradas las aleaciones de alta resistencia. En este proyecto se trabajará únicamente con las de serie 6xxx y 7xxx, obtenidas en forma de chapa laminada de 2000 mm de largo y 1000 mm de ancho a través de la empresa *Alu-Stock S.A.* con grosores que van desde los 1,5 mm hasta los 3 mm, y que vienen térmicamente tratadas en T4 y T6 respectivamente.



**Figura 5.1:** Clasificación de las distintas familias de AA para forja según sus principales constituyentes.

En las **aleaciones de la serie 6xxx** se usan como principales aleantes el Mg y Si en proporciones adecuadas para que formen precipitados de  $Mg_2Si$ . Esto hace que esta aleación sea bonificable o tratable térmicamente. Estas aleaciones son menos resistentes que las de las series 2xxx y 7xxx, en cambio presentan mejor conformabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Además, pueden ser tratadas con un tratamiento T4 y un endurecimiento por una serie de acciones que completen el tratamiento T6. En este trabajo en concreto se hará uso de una **AA6082 T4**, también conocida como *Simagaltok 82*.

En cambio, en las **aleaciones de la serie 7xxx** el Zn es el elemento aleante en mayor proporción, que está presente con valores del 1 al 8%. A veces se añaden pequeñas cantidades de Mg para hacer la aleación tratable térmicamente. También es normal añadir otros



elementos aleantes como Cu o Cr en pequeñas cantidades. Debido a que la principal propiedad de estas aleaciones es su alta dureza, se suele usar en situaciones que requieran de una estructura con mayor resistencia que las de la serie 6xxx. En cambio, la serie 7xxx presenta una menor resistencia a la corrosión bajo tensión, por lo que se le suele aplicar levemente un tratamiento T6 para conseguir mejores propiedades ante la corrosión y mejores propiedades mecánicas. En este trabajo en concreto se hará uso de una **AA7075 T6**, también conocida como *Alzintok 75*.

AA	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Cr	Ti	Zr+Ti	Otro elemento	Total Otros	Al
<b>6082</b>	<b>0,6-1,2</b>	0,4-1,0	≤0,50	<b>0,7-1,3</b>	≤0,10	≤0,20	≤0,25	≤0,10	-	≤0,05	≤0,15	Resto
<b>7075</b>	2,1-2,9	≤0,30	≤0,50	≤0,40	1,2-2,0	<b>5,1-6,1</b>	0,18-0,28	≤0,20	≤0,25	≤0,05	≤0,15	Resto

*Tabla 5.2: Composición química de las AA6082 T4 y AA7075 T6 facilitadas por AluStock S.A.*

AA	Estado	E [MPa]	G [MPa]	$\nu$	T <sub>f</sub> [C°]	C <sub>p</sub>	$\alpha$ [ $\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	$\rho_{el}$ [ $\text{n}\Omega \text{m}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
<b>6082</b>	<b>T4</b>	70.000	26.400	0,33	575 - 650	894	23,1	2.710	41,0	167
<b>7075</b>	<b>T6</b>	72.000	27.100	0,33	475 - 635	862	23,5	2.810	52,0	134

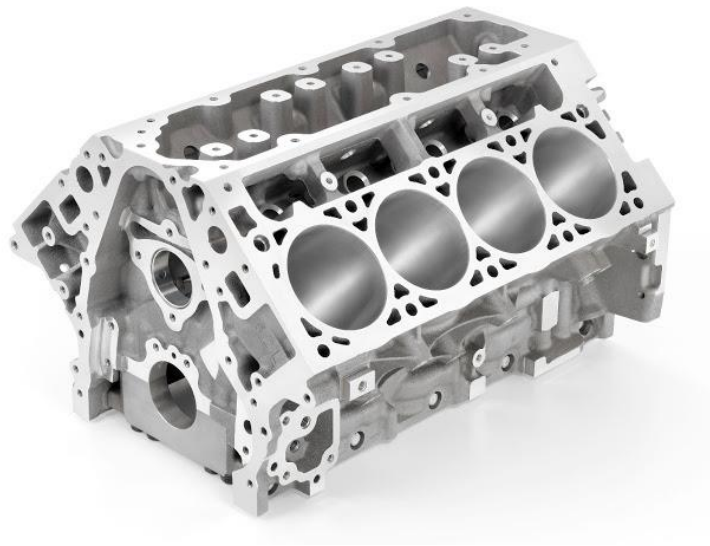
*Tabla 5.2: Propiedades mecánicas, físicas, térmicas y eléctricas de las AA6082 T4 y AA7075 T6 facilitadas por AluStock S.A.*

### 5.1.1. Aplicaciones

A pesar de que el aluminio puro es un material poco usado, da la casualidad de que las aleaciones de este material son ampliamente usadas en una grandísima variedad de aplicaciones tanto a nivel industrial como a otros niveles. El empleo de las AA puede ser agrupado según sus propiedades, como la resistencia, peso, resistencia a la corrosión y muchas otras.

Por ejemplo, la combinación de su ligereza con la resistencia, y alta conductividad eléctrica y térmica son las propiedades que hacen del aluminio y sus aleaciones sean materiales de construcción muy importantes para **máquinas de transporte, la fabricación de motores**

(Figura 5.1), **utensilios de cocina y pistones de motores de combustión interna** por su conductividad térmica y **tendidos eléctricos de alta tensión y electrónica** por su conductividad eléctrica y bajo peso. Las líneas aéreas de aluminio de transmisión eléctrica han sustituido ampliamente a los antiguos materiales y, gracias a la ligereza del aluminio, son necesarios menos postes para sostener los cables. La utilización del aluminio en el **cableado subterráneo** ha aumentado, al igual que en los **transformadores, cajas de fusibles, sistemas de estéreo, televisiones y productos domésticos**. El aluminio solamente presenta un 63% de la conductividad eléctrica del cobre para alambres de un mismo tamaño, pero pesa menos de la mitad. Un alambre de aluminio de conductividad comparable a un alambre de cobre es más grueso, pero sigue siendo más ligero que el cobre.



*Figura 5.2: Bloque motor de un Chevrolet Corvette V8 enteramente fabricado en Aluminio.*

La durabilidad, resistencia a la corrosión, ductilidad y maleabilidad hacen que el aluminio sea una elección natural de la industria de la construcción, sobre todo en elementos extruidos. Las características y propiedades del aluminio como material han hecho posible que arquitectos y diseñadores desarrollen numerosos cambios innovadores en proyectos, en técnicas de edificación y productos ornamentales como **marcos, puertas, ventanas y contraventanas, persianas, mosquiteras, galerías, barandillas, vallas y verjas, pantallas solares y coberturas, parasoles, construcción prefabricada, chapas para contratechos y radiadores intercambiadores de calor**. Además, gracias a la resistencia a la corrosión que presentan las AA frente a otros metales, las hacen aptas para la industria química y para la fabricación de **tubos, recipientes y otra clase de aparatos expuestos a medios de corrosión**.

La resistencia a la corrosión al agua de mar también lo hace útil para la fabricación de **barcos y otros mecanismos acuáticos**.

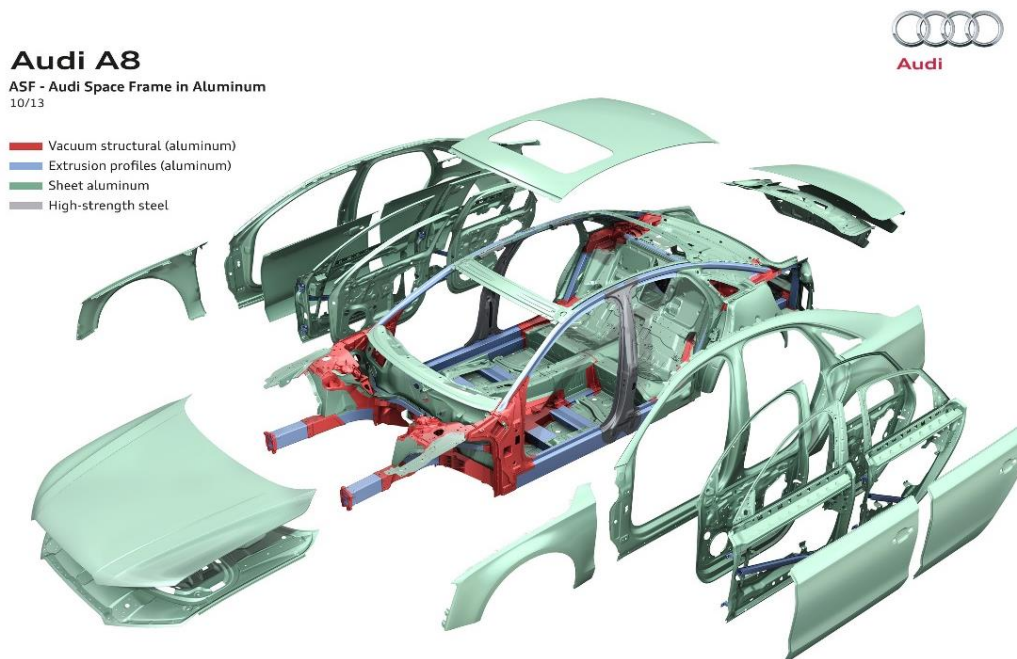
Gracias a su poco peso, a que se moldea fácilmente debido a su bajo punto de fusión, a su excelente compatibilidad con comidas y bebidas gracias por su química inerte y estabilidad metalúrgica, el aluminio es empleado como **papel de envolver, envases de bebidas, recipientes de cosméticos, latas de conserva, tapas de botella, contenedores, otros envoltorios flexibles y tetrabriks**. Es ligero e impermeable, con excelentes propiedades que protegen productos de la luz, humedad, el oxígeno y los microorganismos que pueden alterar la conservación. No es tóxico, no tiene sabor y es inodoro, por lo que no tiene rival como material de envase para alimentos y productos farmacéuticos y cosméticos.

Gracias a las propiedades de reacción exotérmicas del aluminio podemos encontrar otras aplicaciones como la **soldadura aluminotérmica**, que es un proceso de soldadura en carriles y vías donde una fuerte reacción exotérmica funde y suelda las vías de acero. También puede ser usado como **combustible químico o explosivo en fuegos artificiales**, en **reactores nucleares** debido a su capacidad de absorber neutrones y en **depósitos criogénicos** por sus excelentes propiedades a bajas temperaturas. Además, con el aluminio oxidado ( $Al_2O_3$ ), también conocido como Alúmina, se puede formar lo que se conoce como *corindón*, una gema utilizada **en joyería y en la fabricación de láseres**, ya que puede adquirir una coloración rojiza para formar el **Rubí** o una coloración azulada para formar el **Zafiro**.

Las aplicaciones principales que son verdaderamente interesantes para este proyecto son aquellas en las que el aluminio se emplea como aleación de alta resistencia y bajo peso. Estas características hacen que el aluminio sea un material ideal para la construcción de partes de estructurales de distintos medios de transporte, como en ferrocarriles y en la industria aeronáutica y la automoción, como bien se ha explicado anteriormente. Dentro de estos tres campos podemos encontrar **motores, bombas, pistones, ruedas, bielas, cubos, válvulas, marcos y acabados, paragolpes, compuertas para camión, furgonetas, elementos de carrocería como chapas, radiadores e intercambiadores de calor**. El sector de los transportes es en el que más se emplea el aluminio, aproximadamente un tercio de todo el metal consumido en Europa. Y la principal razón, como ya se ha mencionado, es el coste energético que conlleva mover peso.

Las AAAR presentan su principal aplicación en la fabricación de **aeronaves, misiles y en la industria aeroespacial en general**, como así también, en **accesorios y tanques para líquidos combustibles y de oxígeno**. En este caso, las AA6082 se emplean en aplicaciones estructurales como **elementos arquitectónicos, cuadros de bicicleta, pasamanos de los puentes, equipos de transporte y otras estructuras soldadas**. Las AA7075 son más duras que las anteriores, por lo que se usan en las **estructuras de los aviones**, concretamente en la parte superior de las

alas en las que se precisa una gran resistencia, **equipos móviles, otras partes altamente reforzadas**, aplicaciones deportivas de alto nivel como **platos y piñones de bicicleta y para bastones de esquí de competición**. Pero ambas tienen una aplicación en común, y es que cada vez son más usadas en **estructuras de automóviles resistentes a impactos** para sustituir las actuales de acero. El empleo de estas aleaciones en el chasis, reducen enormemente su peso, pero aumentan su coste, por lo que la mayoría de su uso aún se reduce principalmente a coches de alta gama como *Audi, Jaguar, BMW, Bugatti* y muchos más (Figura 5.2).



**Figura 5.3:** Carrocería exterior y chasis del nuevo Audi A8 2018 fabricado prácticamente en su totalidad de AAAR.

## 5.2. Tratamientos térmicos (TT)

Los TT son un conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo unas condiciones controladas de temperatura y tiempo de permanencia, entre otros muchos parámetros. Entre los TT a las que son sometidas las AAAR se encuentran los tratamientos térmicos de solución (SHT) y los tratamientos térmicos de endurecimiento estructural como el envejecimiento natural (T4) y artificial (T6), también conocidos como tratamientos de precipitación.

Es de suma importancia documentarse sobre los parámetros de temperatura y tiempo de permanencia de cada uno de los tratamientos para optimizar y conseguir las propiedades finales ideales de cada material, así como conocer los distintos tipos de hornos para

seleccionar el que mejor se adapte a las necesidades de cada tratamiento. En este apartado se profundizará en cada uno de los aspectos teóricos mencionados anteriormente que ayudaran a comprender los ensayos realizados en la metodología del trabajo.

### 5.2.1. Tipos de Hornos

Los hornos industriales son equipos o dispositivos en los que se calientan las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente. El objetivo de este calentamiento puede ser para fundir, ablandar el material para una posterior etapa de conformado, para recubrir las piezas con otros elementos o, como en el caso de este trabajo, tratar térmicamente para mejorar determinadas propiedades.

Entre los hornos industriales más comunes podemos encontrar los **hornos cubilotes** que se usan para la fundición y procesos de colada, **hornos de reverbero y rotativos** que se emplean para fundir grandes cantidades de material u **hornos de crisoles** aislados del material empleado como combustible. En este caso, se hará uso de los **hornos eléctricos** industriales, ya que presentan varias ventajas respecto al resto de hornos: pueden obtenerse temperaturas muy elevadas de incluso 3500 °C en algunos tipos, mayor control en la velocidad de la calentamiento y en temperaturas isotérmicas, regulación automática de las fases de calentamiento y enfriamiento, carga libre completamente de contaminación del gas combustible, control absoluto de la atmosfera en contacto con el material a tratar pudiendo hacerla oxidante, reductora, inerte o incluso a vacío, mayor duración de los revestimientos, y posibilidad de instalarlos en espacios reducidos y transportarlos de un lado a otro con la ayuda de ruedas. De modo que queda claro que el uso de un horno eléctrico es más beneficioso para este proyecto que los clásicos hornos de fundición anteriormente descritos.

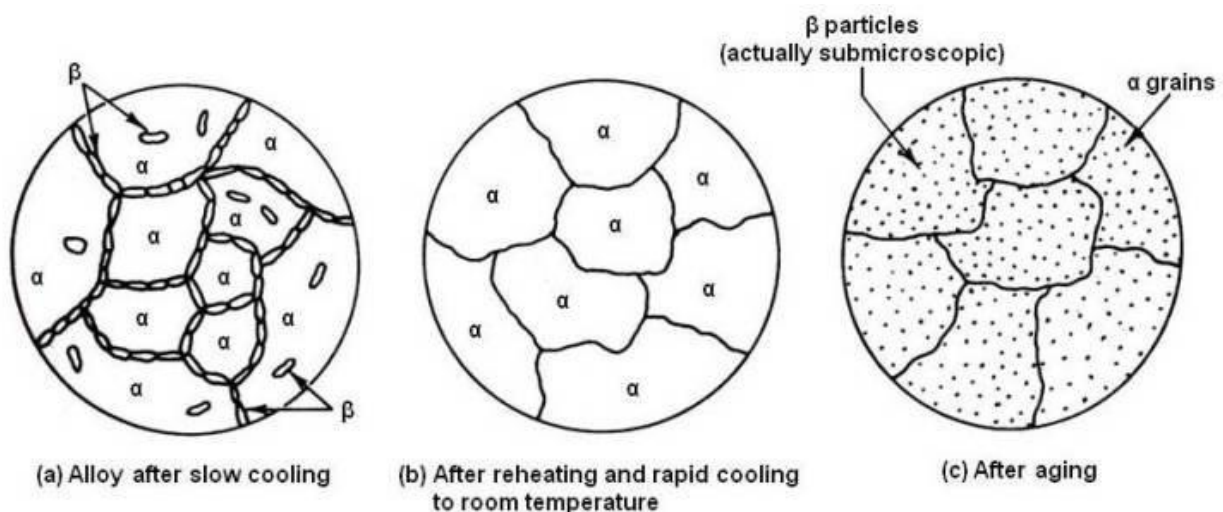
A su vez, entre los hornos eléctricos podemos encontrar varios tipos, como son los **hornos eléctricos de arco**. Estos hornos están provistos de unos electrodos de grafito o de carbón amorfo que favorecen la aparición del arco eléctrico además de aguantar el alto voltaje al que son sometidos. Su uso queda muy limitado a la fundición, por lo que no son los ideales para emplearlos para tratamientos térmicos. En los **hornos eléctricos de inducción** en cambio, el calor se genera por corrientes inducidas por una corriente alterna a baja, alta frecuencia o por un sistema electrónico.

Para este proyecto en concreto, la mejor opción es el uso de **hornos eléctricos de resistencia**. En este tipo de hornos el calor está producido por el efecto *Joule* al circular una corriente eléctrica por una resistencia. Las resistencias transfieren el calor a la carga a través de la radiación. Este tipo de hornos por radiación suelen alcanzar los 1400 °C, valores muy superiores a los que se necesitan ya que los puntos de fusión de las aleaciones de aluminio

rondan los 660 °C. Existe una variante muy interesante de estos hornos eléctricos, equipados con un sistema de recirculación forzada de aire caliente por medio de un ventilador apto para altas temperaturas y que favorecen la transmisión de calor por convección, además de por radiación. La temperatura de estos hornos en cambio está más limitada, a unos 800 °C, ya que los ventiladores están también sometidos a las altas temperaturas y son más susceptibles a la corrosión. Así pues, el horno adecuado para este trabajo es el horno eléctrico de resistencia con o sin ventilador. En la metodología se explicará el proceso seguido para determinar cuál de las dos variantes es la óptima para la correcta realización de los tratamientos a ensayar.

### 5.2.2. Tratamiento térmico de Solución (SHT)

El tratamiento térmico de solución (SHT) consiste principalmente en el calentamiento de una aleación metálica a una temperatura específica, manteniéndola a dicha temperatura el tiempo suficiente para provocar que uno o más constituyentes entren en una solución sólida. Normalmente esta etapa sirve para disolver cualquier precipitado existente en la propia matriz, para así poder preparar la aleación para un posterior tratamiento de endurecimiento (Figura 5.3). Dicho de otro modo, el SHT se trata una etapa de acondicionamiento en la que se borra el “historial térmico” previo y se prepara la aleación para conferirle las propiedades mecánicas deseadas.



*Figura 5.4: Cambio de la microestructura de una AA durante el SHT y el envejecimiento*

Dicho tratamiento es ampliamente empleado en muchos sectores industriales: la mayoría de las aleaciones metálicas pueden resultar endurecidas durante el proceso de fabricación, lo



que limita la capacidad de seguir conformándolas. Por lo que el SHT además de aliviar tensiones generadas durante la fabricación, reduce considerablemente esta condición de endurecimiento. Este tratamiento es aplicado también en las aleaciones que sufren un prematuro endurecimiento debido al envejecimiento natural de precipitación. Este fenómeno de disolución de los precipitados o los constituyentes en la matriz se ve favorecido gracias a las altas temperaturas. De modo que una vez el material vuelva a la temperatura ambiente, los constituyentes tenderán a agruparse y liberarse de la matriz de nuevo. Así que a continuación, será necesario un temple para poder “congelar” este estado a temperatura ambiente, como bien se explicará en los siguientes apartados.

Es de suma importancia que la disolución de los constituyentes sea total tanto en la superficie de la pieza como en el centro. Esto hace que los tiempos del SHT varíen según el grosor de la pieza y el material. Cuanto más gruesa sea la pieza, mayores tiempos de solución serán necesarios para favorecer la transmisión de calor hasta el centro de la pieza y, por tanto, favorecer la total disolución de los precipitados. Además, dependiendo del material no solo cambiarán los tiempos de solución por las distintas conductividades térmicas que presentan estos, sino que también cambiará la temperatura óptima del tratamiento. Las AA presentan distintos tipos de precipitados según sus principales aleantes, por lo que serán necesarios distintas temperaturas de solución para disolver dichos precipitados.

Como bien se ha visto, es de suma importancia documentarse sobre las temperaturas y los tiempos en horno para cada AA y favorecer un óptimo SHT, ya que uno de los cometidos de este trabajo, es establecer dichos tiempos y temperaturas para optimizar los TT. Por lo que se ha realizado una búsqueda bibliográfica previa en base a artículos y otra clase de documentos (Tabla 5.1), con el fin de establecer unos valores aproximados de tiempos y temperaturas para no dar “palos de ciego”. En la metodología, por tanto, se llevará a cabo un afino de dichos parámetros.

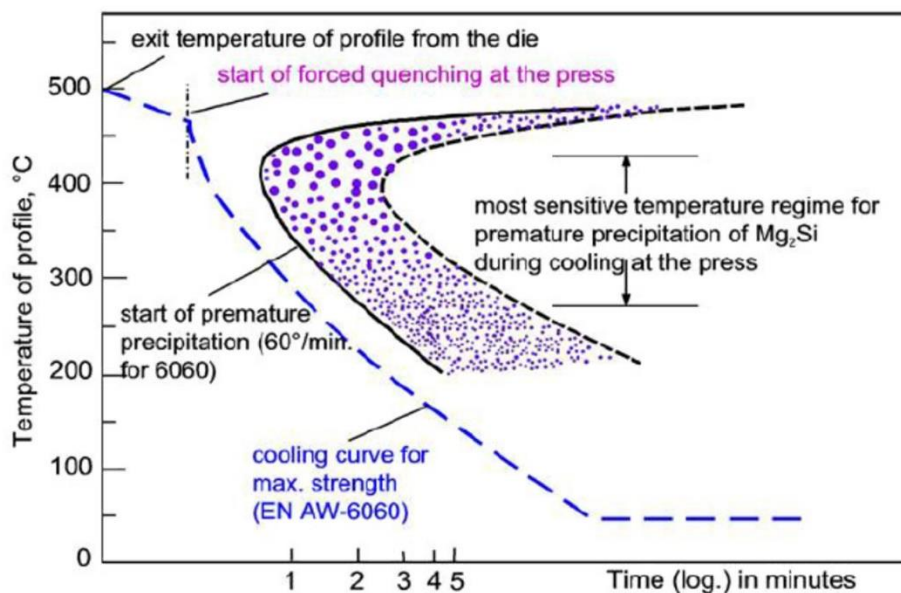
AA	Temperatura ópt. SHT	Tiempo ópt. SHT
6082 T4	550 °C	20-25 min
7075 T6	480°C	15-20 min

**Tabla 5.3:** *Temperaturas y tiempos óptimos de SHT para las AA6082 T4 y AA7075 T6 según las fuentes bibliográficas*

### 5.2.3. Métodos de temple (curvas “C”)

El temple es uno de los pasos más críticos durante los TT de las AA. Sin un temple adecuado, los constituyentes podrían volver a agruparse y liberarse de la matriz después de su disolución sólida para volver a formar precipitados, por lo que el SHT sería en vano. Por eso se somete al material a un cambio de temperatura muy brusco desde la temperatura de solución hasta temperaturas muy inferiores a esta, como la temperatura ambiente o incluso temperaturas bajo cero en muchos casos. Este repentino enfriamiento “congela” la estructura que se ha obtenido en el SHT y así, se consigue mantener el aluminio y el resto de elementos diluidos de forma sólida y a temperatura ambiente. A este estado de la aleación se le conoce como solución sólida súper saturada (SSSS) o estado *W-temper*.

En dicho estado, el material se vuelve casi tan blando como el aluminio puro debido a la ausencia de precipitados que impiden el avance de las dislocaciones a lo largo de la estructura cristalina y, por lo tanto, es el estado ideal para conformar aleaciones de muy alta resistencia. Cuanto más rápido sea este enfriamiento, menos probabilidades hay de que se formen precipitados durante el propio temple y mayor será el tiempo hasta que se vuelvan a formar dichos precipitados. Es decir, a mayores velocidades de enfriamiento, más blando se vuelve el material en el estado *W-temper*, la difusividad de los constituyentes será menor y más tiempo aguantará en este estado hasta la formación de precipitados y su posterior endurecimiento natural.



Source: after C. V. Lynch, Z. Metallkunde, 1970

**Gráfica 5.1:** Diagrama CCT o Curva “C” correspondiente a una AA6060 de (Al-Mg-Si) para determinar la velocidad de enfriamiento mínima.



Se define como la *velocidad crítica de enfriamiento* en el temple, la velocidad mínima a la que puede ser enfriada una aleación sin sufrir una formación indeseada de precipitados. Un enfriamiento superior a dicha velocidad crítica garantiza un temple adecuado. Pero de igual manera, no todas las AA presentan la misma *velocidad crítica de enfriamiento* ya que no todos los elementos se disuelven de la misma manera en el aluminio. Algunos constituyentes presentan mayor facilidad para ser disueltos que otros, o para ser liberados por un mecanismo de difusión. La calidad del temple puede ser evaluada fácilmente gracias a los diagramas de Transformación en enfriamiento continuo (CCT, *Continuous Cooling Transformation*) o también conocidas como curvas “C” (Figura 5.4). Estas graficas ayudan a establecer una *velocidad crítica de enfriamiento*, así como la cantidad de precipitados formados cuando no se alcanza esta velocidad crítica para cada aleación. Digamos entonces, que algunas AA se templean más fácilmente que otras, y el medio de temple puede ser distinto.



**Figura 5.5:** *Temple en agua de distintas espadas y armas de acero en antiguas herrerías tradicionales.*

Existen distintos medios de temple como el agua, el aire o el contacto directo bajo presión con un medio sólido y frío. Hay multitud de técnicas para ello, solo será necesario encontrar la adecuada para cada tipo de material. Uno de los medios de temples más agresivos y antiguos que existe es el agua, ya que dispersa el calor muy rápidamente y la violencia de enfriamiento es muy rápida, aunque puede provocar deformaciones en la pieza. Por eso, la temperatura del agua es también importante. Este método de temple ya era usado por los herreros de la edad media para fabricar espadas con un duro filo (Figura 5.5). Se podían usar medios menos radicales, como aceite, o baños de plomo y estaño fundido. También se usaba agua con sales disueltas, que modifican la capacidad de extracción de calor del líquido. De ahí las antiguas

costumbres de emplear orina de caballo para el templado, o las historias de que los Espartanos y otros griegos introducían las espadas al rojo vivo en el cálido cuerpo de sus prisioneros de guerra para templar sus mejores espadas con sangre tibia.

Las aleaciones difíciles de templar por lo tanto suelen ser templadas en agua, aceite, salmuera y otros medios líquidos. Las denominadas aleaciones autotemplables en cambio, pueden ser fácilmente templadas por si mismas al aire, como su propio nombre indica, ya que presentan una *velocidad critica de enfriamiento* muy lenta y los constituyentes quedan fácilmente disueltos en la matriz. Por otro lado, existen aleaciones con una *velocidad critica de enfriamiento* intermedia como son las **AA6xxx** y **AA7xxx**. Esto supone una gran ventaja, ya que pueden ser templadas en contacto directo con un medio sólido bajo presión, como, por ejemplo, en el troquel de una prensa. Por lo que la pieza puede ser calentada y conformada a la temperatura SHT, aprovechando su baja resistencia y alta ductilidad en este estado, y templarla en el propio troquel durante su conformado. De modo que prescindiríamos totalmente de otra etapa para templar la pieza en agua y del uso de prensas de gran fuerza para su conformado. A este método de conformado se le conoce como *Hot Stamping* o estampación en caliente, y que será explicado en los siguientes apartados.

#### 5.2.4. Envejecimiento Natural y Artificial

El desarrollo de las propiedades mecánicas finales del material para satisfacer los criterios específicos de diseño de piezas, requiere que el material sea sometido a un ciclo prolongado a una temperatura elevada, pero inferior a la del SHT, para que pueda desarrollarse una microestructura específica de la aleación mediante el endurecimiento por envejecimiento o precipitación. Es decir, una vez el “historial térmico” ha sido eliminado y la pieza ha sido conformada, es la hora de formar precipitados controlados, con unas características específicas, con el único fin de otorgar al material unas propiedades mecánicas a medida. La mejora de las propiedades se da gracias a la difusión de los constituyentes que tienden a agruparse para formar precipitados, y bloquear el avance de las dislocaciones durante la deformación de la pieza. Estas dislocaciones se acumulan y hacen que sea más difícil seguir deformando la pieza, por lo que su ductilidad queda reducida, pero su resistencia y dureza se ven drásticamente aumentadas. De modo que se obtiene una AA muy resistente a la vez que ligera.

La formación de precipitados se obtiene gracias al proceso de difusión de los elementos para agruparse y formar fases sólidas muy duras en una matriz de aluminio. Como se ha indicado anteriormente, las distintas aleaciones presentan distintas capacidades de solubilización y difusión de sus constituyentes, por lo que algunas envejecerán más rápido que otras, o algunas podrán ser envejecidas a temperatura ambiente y otras a temperaturas superiores.

De tal forma que se conoce como **envejecimiento natural** o **T4** al proceso por el cual el material forma precipitados a temperatura ambiente, sin necesidad de hornos, en un proceso lento y largo. En cambio, se le denomina **envejecimiento artificial** o **T6** cuando dicha formación de precipitados es forzada con ayuda de un tratamiento en horno a una temperatura específica. Existen otros muchos tratamientos de endurecimiento con diferentes variantes (Tabla 5.4), y cada de uno de ellos presenta sus pros y sus contras.

Tratamiento	Descripción
T1	Temple desde la temperatura de reblandecimiento + envejecimiento natural
T2	Temple desde la temperatura de reblandecimiento + envejecimiento natural
T3	SHT + temple + deformado + envejecimiento natural
T4	SHT + temple + envejecimiento natural
T5	Temple desde la temperatura de reblandecimiento + envejecimiento artificial
T6	SHT + temple + deformado + envejecimiento artificial
T7	SHT + temple + deformado + sobre-envejecimiento
T8	SHT + temple + deformado +
T9	SHT + temple + envejecimiento artificial + deformado
T10	Temple desde la temperatura de reblandecimiento + deformado + envejecimiento artificial

**Tabla 5.4:** *Definición de distintos tratamientos de endurecimiento que se les aplica comúnmente a las AA y otras muchas aleaciones metálicas.*

Algunas aleaciones pueden ser endurecidas a temperatura ambiente con el envejecimiento natural sin necesidad de hornos como en el caso de las **AA6xxx**, pero requieren de largos tiempos de almacenamiento y control. Estas aleaciones suelen tener una alta capacidad para formar precipitados sin necesidad de aumentar su temperatura artificialmente. Esto puede suponer un inconveniente si lo que queremos es conformar la pieza en el estado *W-temper*, ya que se dispone de poco tiempo desde su temple hasta que la pieza comience a endurecer por sí sola. Muchas empresas de aeronáutica someten al aluminio a temperaturas criogénicas durante su almacenaje, para retrasar la aparición de precipitados hasta su colocación o conformado final.

Otras aleaciones en cambio, como las **AA7xxx**, pueden ser fácilmente almacenadas ya que la formación de precipitados no es inmediata. Normalmente a estas aleaciones se las somete a tratamientos T6 controlados en horno una vez quieran ser endurecidas después de su conformado. Es de suma importancia controlar los tiempos y temperaturas en horno, para evitar lo que se conoce como **sobre-envejecimiento**. En este estado los precipitados crecen de forma irregular, desmesurada, heterogénea y con una morfología puntiaguda, lo que

fragiliza el material y reduce sus propiedades mecánicas. Las puntas de los precipitados actúan como concentración de tensiones y favorecen la formación de grietas. Por ese motivo es importante documentarse sobre las temperaturas y los tiempos en horno para cada aleación de aluminio, ya que uno de los cometidos de este trabajo, es establecer dichos parámetros para optimizar los tratamientos de endurecimiento y al mismo tiempo obtener las mejores propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas principales para las AA7075 en estado T6 y para las AA6082 en T4 según la norma estandarizada, vienen definidas en la siguiente tabla (Tabla 5.5):

AA	T4			T6		
	$\sigma_y$ (0.2)	UTS	A50	$\sigma_y$ (0.2)	UTS	A50
6082 T4	110 MPa	205 MPa	15 %	260 MPa	310 MPa	10 %
7075 T6	-	-	-	460 MPa	540 MPa	8 %

*Tabla 5.5: Temperaturas y tiempos óptimos de SHT y de envejecimiento artificial para las AA6082 T4 y AA7075 T6 según las fuentes bibliográficas.*

De igual modo, se ha realizado una búsqueda bibliográfica previa en base a artículos y otra clase de documentos, con el fin de establecer unos valores aproximados de tiempos y temperaturas para los envejecimientos artificiales (Tabla 5.6). En la metodología, por tanto, se llevará a cabo un afino de dichos parámetros.

AA	SHT		Temple en agua	Envejecimiento artificial	
	Temperatura ópt.	Tiempo ópt.		Temperatura ópt.	Tiempo ópt.
6082 T4	550 °C	20 - 25 min		190 °C	1 - 4 h
7075 T6	480°C	15 - 20 min		120 °C	24 - 48 h

*Tabla 5.6: Temperaturas y tiempos óptimos de SHT y de envejecimiento artificial para las AA6082 T4 y AA7075 T6 según las fuentes bibliográficas.*

### 5.3. Conformado en caliente

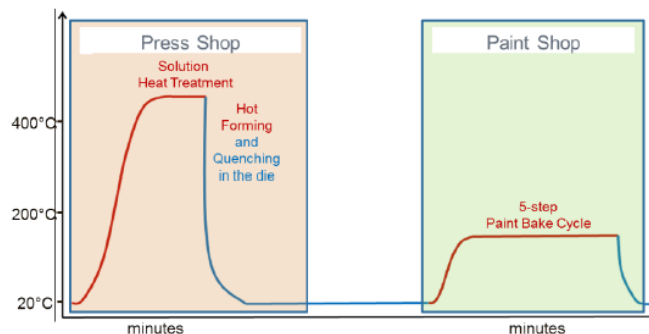
El conformado en caliente es un proceso innovador a través del cual se pueden estampar aleaciones metálicas de muy alta resistencia en formas complejas y de una forma más eficiente que el convencional conformado en frío. Este calentamiento implica que la pieza se vuelva maleable, y sea fácil conformarla a la vez que se enfría rápidamente en los troqueles especialmente diseñados para ello. Gracias a esta capacidad de combinar eficazmente

resistencia y complejidad, con la estampación en caliente se consiguen piezas ligeras que de ser productivas con estampación en frío implicarían soldar piezas más gruesas entre si y como ha sido explicado anteriormente, las AA son difíciles de soldar.

Actualmente la estampación en caliente es una de las mejores soluciones para el aligeramiento de peso de las piezas estructurales y la carrocería exterior de los vehículos terrestres y aéreos. Mejora el comportamiento en caso de colisión y garantiza la seguridad del pasajero a un menor peso y tiempo de producción ya que no son necesarios varios procesos para conformar, como en el caso del conformado en frío. Dentro de la estampación en caliente para piezas de AAAR, existen varios métodos avanzados entre los que se pueden destacar la Estampación en caliente o *Hot Stamping/Forming* tradicional, el Estampado templado o *Warm forming* y la Estampación en estado *W-temper*. A continuación, se explicará en que consiste cada uno de estos métodos, sus ventajas y desventajas, y una breve comparación de todos ellos.

### 5.3.1. *Hot Forming* tradicional

Este método tradicional de estampación en caliente comienza por aplicarle un SHT a las piezas para disolver los precipitados y hacer que el material se vuelva maleable. En este estado dúctil y a alta temperatura, la pieza preformada es introducida en la prensa y conformada junto a un brusco temple, gracias a que entra en contacto con el troquel frío, refrigerado y bajo una alta presión ejercida por la propia prensa. De manera que una vez la pieza esta fría, la prensa se abre y se extrae la pieza ya conformada en el estado *W-temper*. Por último, la pieza puede ser tratada térmicamente con T6 o T4 para obtener las propiedades mecánicas deseadas (Figura 5.6). Debido a la altísima resistencia y dureza de las AA7xxx y a la facilidad de las AA6xxx para ser templadas sin necesidad de agua, este método es de los más adecuado para conformarlas.



**Gráfica 5.2:** Diagrama esquemático de tiempo-temperatura para el *Hot Stamping/Forming* en piezas de AA7xxx

La ventaja de este proceso reside en que se consigue una alta capacidad de embutición por lo que es ideal para conformar aleaciones de altísima resistencia y dureza como las AA7xxx. Además, la recuperación elástica o *springback* de las piezas es menor, consiguiendo así una mayor precisión en la forma final. Entre las desventajas de este proceso podemos destacar el alto desgaste de los troqueles, la complejidad de estos debido a la necesidad de un circuito de refrigeración en su interior, el *galling* o gripado por la adhesión de pequeñas cantidades de material al troquel, menor productividad por los tiempos de enfriamiento dentro de la prensa y la necesidad de usar lubricante especial para altas temperaturas. Esta lubricación tiene que ser realizada durante la transferencia en caliente de la pieza desde su salida del horno hasta su entrada en la prensa, de forma rápida y precisa (Figura 5.7). Un atraso en el tiempo de transferencia podría causar la aparición de precipitados por causa de un lento enfriamiento al aire, por lo que será necesario enfriar el material en el troquel lo antes posible para garantizar el estado de una solución sólida súper saturada a temperatura ambiente.



**Figura 5.6:** Esquema de los diferentes puestos de trabajo para el proceso de Hot Stamping/Forming

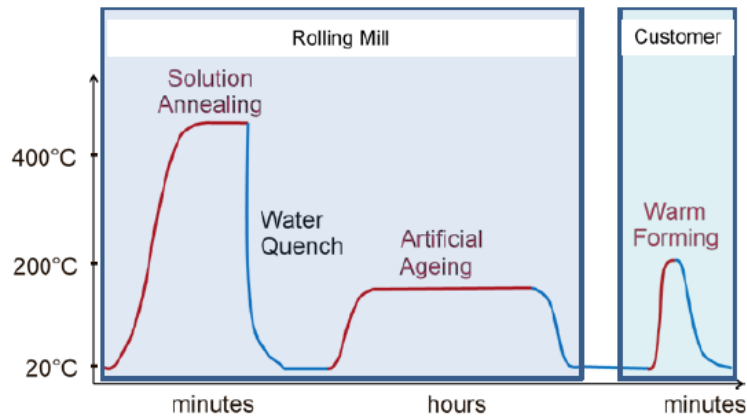
### 5.3.2. Warm Forming

En este método de estampación en cambio, se usan temperaturas medias o templadas, de entre 200 y 250 °C. En general, los utillajes se mantienen templados con ayuda de resistencias eléctricas para que las chapas no pierdan temperatura y sigan siendo medianamente maleables. El proceso comienza con la aplicación de un tratamiento completo a las chapas, o pueden venir ya endurecidas con un T6 o T4. A continuación, se calientan hasta la temperatura intermedia o templada, una temperatura suficientemente alta como para volver la pieza maleable pero no tanto como para disolver los precipitados que endurecen el material. En este estado y a esta temperatura, la chapa es lubricada y conformada.

Las ventajas de este proceso son que la capacidad de embutición sigue siendo alta y que los troqueles se desgastan menos y sufren un *galling* menor que en el *Hot stamping* tradicional.



Además, el uso de bajas temperaturas implica un ahorro energético considerable y el proceso queda enormemente reducido si el estado de compra de las chapas es en T6 o T4. La mayor desventaja en cambio, es que las propiedades finales del material no son tan buenas como en el anterior proceso.



**Gráfica 5.3:** Diagrama esquemático de tiempo-temperatura para el Warm forming

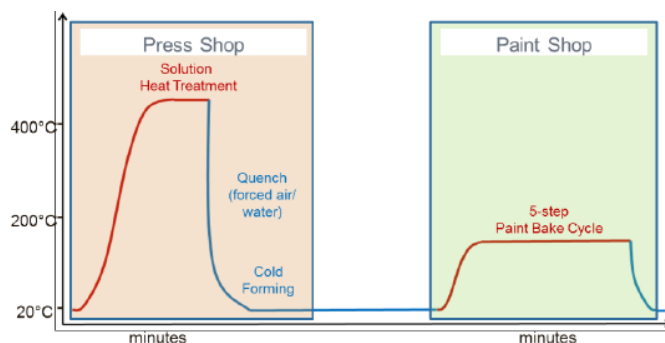
Los precipitados, aunque no hayan sido disueltos totalmente, sí que han sufrido una pequeña difusión de sus constituyentes por la exposición a las altas temperaturas. Es decir, este proceso puede debilitar dichos precipitados y eso afecta directamente a las propiedades finales de la pieza. Además, no todas las aleaciones valen para este proceso. Deben de ser unas aleaciones en las que la integridad de sus precipitados no se vea afectada por la exposición a estas temperaturas intermedias y sigan manteniendo las propiedades finales después de ser conformadas.



**Figura 5.7:** Esquema de los diferentes puestos de trabajo para el proceso de Warm Forming

### 5.3.3. Conformado en estado *W-Temper*

El conformado en estado *W-temper* puede que sea la variante más innovadora de la estampación en caliente para AAAR. Como su propio nombre indica, el conformado se realiza en el estado *W-temper* del material. El primer paso de este proceso consiste en someter a la chapa a un SHT seguido de un temple agresivo y rápido en agua. Esto hace que el material quede blando y maleable a temperatura ambiente por la falta de precipitados. Antes de que el material comience a endurecer por el envejecimiento natural, se lubrica y se conforma en frío. Después del conformado, se le aplica el tratamiento de endurecimiento deseado, ya sea el T6 o el T4.



**Gráfica 5.4:** Diagrama esquemático de tiempo-temperatura para el conformado en estado *W-temper*.

La principal ventaja de este proceso es que el material se conforma en frío y se evitan el desgaste, el *galling* y la manipulación en caliente de la chapa. El material se deforma menos que en el caso del *Hot* o *Warm forming*, pero presenta una embutición mayor. Además, los troqueles no requieren de resistencias eléctricas para mantener la temperatura o circuito de refrigeración para templar la chapa. Entre las desventajas podemos encontrar, como ya se ha mencionado, que la fuerza necesaria para conformar la pieza es mayor, ya que no es tan blanda como en los otros procesos.



**Figura 5.8:** Esquema de los diferentes puestos de trabajo para el proceso conformado en estado *W-temper*.





Además, el material no debe presentar un endurecimiento natural muy rápido para que no comience a endurecer antes de introducirlo en la prensa. Las AA7xxx son ideales para el proceso de conformado en estado *W-temper*, ya que son más difíciles de templar y este proceso implica un temple en agua, y también, aparentemente aguantan largos periodos de tiempo en este estado sin endurecerse. Esto permite que sean almacenados durante un corto periodo de tiempo y así, otorgar una cierta flexibilidad al proceso de conformado.

Process	Transfer +Press system *	Tooling **	Galling wear	Geom. Accuracy ***	Draw-ability	Formability	PF Heat treatment ****
W-Temper							
Warm Forming							
Hot Stamping							

\* Complexity of the sheet handling system (temperature exposure)/ Available press systems (new heating oven, heated dies, stop on BDC)

\*\* Tool complexity (normal, heating cartridges, cooling channels)

\*\*\* Springback after forming

\*\*\*\* The need of post forming artificial ageing

**Tabla 5.7:** Comparación de las ventajas y desventajas entre el Hot Stamping tradicional, Warm forming y el conformado en estado *W-temper*.

## 6. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

En este apartado se estudiarán diferentes alternativas o soluciones que se podrían haber adoptado en lugar de haber seguido las pautas tomadas. Este punto se divide en dos grandes subgrupos: en el análisis de alternativas del método de conformado y en el de la elección de materiales de alta resistencia y ligeros.

### 6.1. Elección del Material

Uno de los objetivos de este proyecto es mejorar el proceso de conformado y, por lo tanto, las propiedades finales de las AA mediante el ajuste fino de los parámetros de los TT. Existen otra serie de materiales capaces de alcanzar las especificaciones mecánicas o ligereza del aluminio, y por tanto ser empleados en la reducción de peso para las piezas de chasis y placas exteriores de vehículos.

#### 6.1.1. Aleaciones de aluminios de alta resistencia (AAAR)

Las aleaciones de aluminio de alta resistencia (AAAR) presentan una perfecta combinación sinérgica entre resistencia mecánica y ligereza, lo que las hace de las aleaciones metálicas más aptas para el uso de paneles en estructuras para aeronáutica y piezas para el chasis de automóviles. Lo que se busca con estos aluminios es sustituir los pesados aceros en los coches para así, reducir el peso completo del coche, y mejorar el resto de prestaciones gracias a la reducción de peso, como reducir el consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>. Entre las AAAR se han seleccionado los de la familia AA6xxx y AA7xxx.

#### 6.1.2. Otros aluminios

Existe una gran cantidad de AA, pero no todas son tratables térmicamente ni presentan las altas resistencias necesarias para sustituir a los AHSS. Además de las AA antes mencionadas, también podemos encontrar aleaciones de alta resistencia entre los de la serie AA2xxx, también conocidos como Duraluminios. Esta serie de aluminios con base cobre presentan unas resistencias muy elevadas, de hecho, fueron de los primeros aluminios en ser empleados en componentes aeronáuticos durante la segunda guerra mundial. Pero estos aluminios, debido a su alto contenido en cobre, carecen de la resistencia a la corrosión bajo tensión necesaria para garantizar la durabilidad de la pieza. También podemos encontrar aleaciones de la serie AA8xxx con base litio y otros componentes, mucho más ligeros que los hasta ahora

mencionados, pero estos también presentan una serie de problemas sin resolver, además de su elevado precio.

### 6.1.3. Materiales Compuestos

Los materiales compuestos de base polimérica, como la fibra de vidrio o fibra de carbono con resina epoxi, están arrasando en muchos sectores de altas prestaciones gracias a su excelente relación entre resistencia y peso, lo que las hacen aparentemente ideales para estas aplicaciones. Pero el coste de estos materiales es sumamente elevado comparado con su capacidad de absorber golpes. A diferencia de otros materiales, no presentan una buena tenacidad a la fractura debido a su escasa capacidad de deformación comparada con la de las AAAR y AHSS, por lo que suelen ser empleadas en componentes de chapa exteriores o en zonas estéticas de interior únicamente (Figura 6.1).

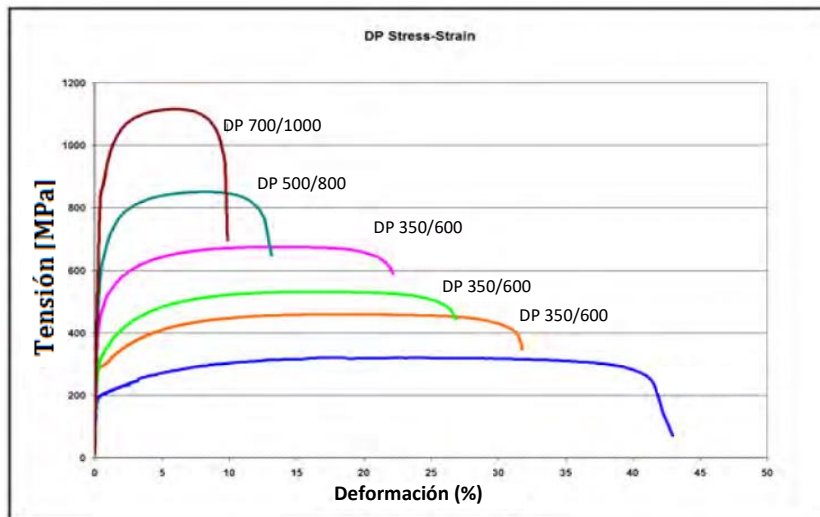


*Figura 6.1: Componentes estéticos internos de fibra de carbono instalados en un BMW F82 M4.*

### 6.1.4. Aceros avanzados de alta resistencia (AHSS)

Sin duda los aceros son las aleaciones ideales en cuanto a seguridad se refiere. Más concretamente, los aceros de altas resistencia como los de fase dual (DP, *Dual Phase*), fase compleja (CP, *Complex Phase*) TWIP, TRIP, martensíticos y demás son los que mejores resistencias y elongaciones presentan, por lo que son sumamente tenaces pudiendo absorber una gran cantidad de energía en el impacto. Estas cualidades junto con su relativamente bajo coste hacen que sean los más empleados para las estructuras de chasis de los vehículos. Así

mismo, cada uno de los tipos de AHSS presentan distintas relaciones de resistencia/deformación, por lo que pueden ser específicamente situadas en distintas zonas del chasis según sus requerimientos (Gráfica 6.1).



Gráfica 6.1: Gráfica tensión-deformación con distintas relaciones de resistencia/deformación de aceros DP.

### 6.1.5. Otras aleaciones no-férreas

La última de las alternativas sería emplear otra clase de aleaciones no férreas que cumplan con los requisitos de alta tenacidad a la fractura y poca densidad, como los metales de base Zinc aleadas con aluminio (Zn-Al), Nickel-Titanio (NiTi) o Nickel-Hierro-Cromo (Ni-Fe-Cr) también conocidas como las súper aleaciones *INCOLOY* entre muchas otras. Sin embargo, estas aleaciones son empleadas en componentes altamente estratégicos, son extremadamente costosas, y se carece de los medios y presupuesto para fabricarlas a gran escala en un proceso industrial automatizado y continuo. La mayoría de ellas son empleadas en aeronáutica de forma puntual, hechas a medida especialmente para cada aplicación, un término también conocido como “*Taylor-made*”.

En este caso se dispone de varias alternativas posibles entre distintos materiales compuestos y aleaciones metálicas, tanto férreas como no-férreas. Los materiales compuestos como la fibra de carbono con matriz epoxídica, a pesar de tener una buena relación resistencia/peso, quedan automáticamente descartadas para estas aplicaciones ya que son bastante rígidos y poco deformables, lo que hace que su tenacidad a la fractura no sea lo suficientemente elevada.

Con el fin de ayudar a seleccionar y justificar la alternativa tomada, se ha hecho uso del nivel 3 del software *CES Edupack 2017*, un software diseñado exclusivamente para la selección y utilización de materiales, con una base de datos de casi 4000 materiales. Para llevar a cabo dicha selección, se han definido una serie de restricciones en base a las propiedades mecánicas, físicas y de impacto que deben soportar las estructuras finales, y el programa automáticamente descartará los materiales que no cumplan con estos requisitos, y ayudará a visualizar el resultado de forma interactiva mediante gráficas de compromiso. Como se puede observar en la siguiente tabla (Tabla 6.1), se han establecido una serie de restricciones en base a distintos criterios: la densidad máxima ha sido fijada en base a los aceros para no descartarlos de la selección, valores entre medios y altos mínimos de tenacidad, deformación, límite elástico y tensión última, y un módulo de Young mínimo con el mismo valor que el del aluminio. Además, se han implementado otros criterios de selección en cuanto al proceso de fabricación se refiere, por lo que se ha definido la fabricación por fundición como no-apta y el conformado tanto caliente como frío como apto, como bien se explicará en el siguiente apartado.

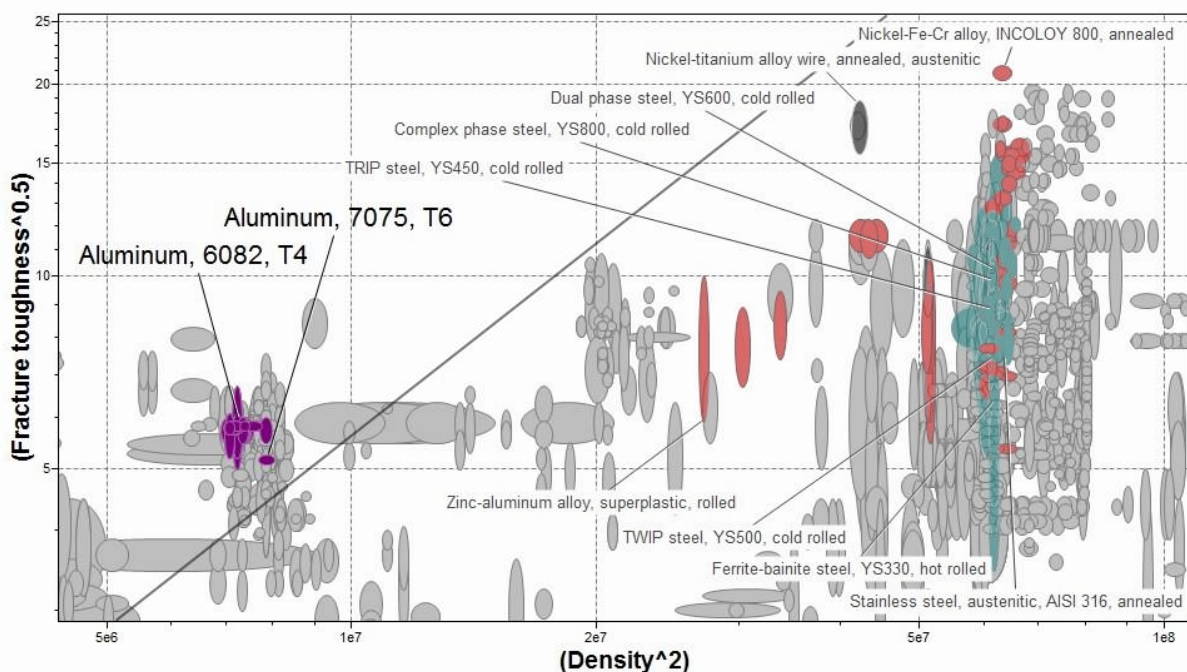
Propiedades	Valores	Propiedades	Valores	Proceso de Fabricación	¿Apto?
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Max -> 8100	E [GPa]	Min -> 70	Fundición	No-apto
Tenacidad fra. [MPa·m <sup>0.5</sup> ]	Min -> 26	$\sigma_y$ [Mpa]	Min -> 130	Conformado en caliente	Apto
$\epsilon$ [%]	Min -> 10	UTS [Mpa]	Min -> 220	Conformado en frío	Apto

**Tabla 6.1:** Restricciones establecidas en el programa *CES Edupack 2017* para la selección y justificación del material.

En base a estas restricciones, el programa ha reducido el número de materiales que cumplen con estos requisitos a unos 443, partiendo de los casi 4000 materiales de los que se disponía inicialmente en la base de datos. Entre esta selección podemos encontrar AHSS como los TWIP, TRIP y DP, aceros inoxidables austeníticos, ferríticos y martensíticos, y otras aleaciones no-férreas como Zn-Al, Ni-Ti o las súper aleaciones INCOLOY (Ni-Fe-Cr) entre otras muchas. Además, la mayoría de las AA se encuentran también dentro de esta selección.

Una vez fijadas las restricciones que debe cumplir el material a seleccionar, es hora de maximizar o minimizar índices mediante gráficas de compromiso para determinar el material que mejor cumplen estas características. Por tanto, se ha llevado a cabo una comparativa entre la tenacidad a la fractura y la densidad de estos materiales. Uno de los objetivos de

este trabajo es el de reducir el peso de los componentes del chasis de los vehículos, y que mantengan una resistencia a los impactos lo más alta posible. De modo que, se ha representado en una gráfica la tenacidad a fractura contra la densidad para visualizar la distribución de los materiales (Gráfica 6.2). Los 443 materiales que cumplen con las restricciones han sido coloreados según sus familias y los que no se representan coloreados indican que no cumplen con las restricciones establecidas. Los valores del eje vertical correspondiente a la tenacidad han sido elevados a  $\frac{1}{2}$  y los valores del eje horizontal, los de la densidad, han sido elevados al cuadrado, para así reducir la importancia de la tenacidad a la mitad y duplicar la importancia de la densidad a la hora de establecer el criterio de selección, ya que lo más importante en este proyecto es reducir el peso de los vehículos a toda costa.



**Gráfica 6.2:** Gráfica de compromiso entre la tenacidad y la densidad con el software CES Edupack 2017.

Si se dibuja una línea con un valor de pendiente unitario, y se eleva esta línea hasta descartar la mayoría de los materiales que queden por debajo de dicha recta, se consigue determinar los materiales que mejor cumplen con los compromisos de tenacidad y densidad establecidos. Como se observa en la gráfica, la familia de materiales que mejor cumplen este criterio son las AA, entre las que se encuentran las AAAR como la AA7075 T6, la AA6082 T4 y los Duraluminios de la familia AA2xxx. Sin embargo, ya se ha mencionado el problema que estos aluminios suponen frente a la corrosión bajo tensión por su alto contenido en cobre, por lo que quedan descartados.



Por tanto, la mejor alternativa para realizar el desarrollo, mejora y optimización de los procesos de *Hot Stamping* para aluminios de alta resistencia, es la de seleccionar las aleaciones de la serie AA6xxx y AA7xxx, y como ya se ha visto, en este caso se ha optado por emplear la AA7075 y la AA6082. De esta manera, su uso queda totalmente justificado.

## 6.2. Conformado

Otro de los objetivos de este trabajo es optimizar el proceso de conformado de estampación en caliente y sus variantes, sobre todo la estampación en estado *W-temper*, y ver la influencia que tienen distintos parámetros en las propiedades finales del material. Dicho conformado puede llevarse a cabo de distintas formas, dependiendo de la alternativa escogida a través de otra clase de estampación en caliente, estampación en frío, mediante colada y mecanizado o incluso por una nueva forma más avanzada llamada *Thixo forming*.

### 6.3.1. Estampación en caliente

En esta primera alternativa se estudiará la estampación en caliente ya que es un proceso innovador a través del cual se pueden estampar aleaciones metálicas de muy alta resistencia en formas complejas y de una forma más eficaz que el convencional conformado en frío. Este calentamiento implica que la pieza se vuelva maleable, y sea fácil conformarla a la vez que se enfría rápidamente en los troqueles especialmente diseñados para ello (Figura 6.2).

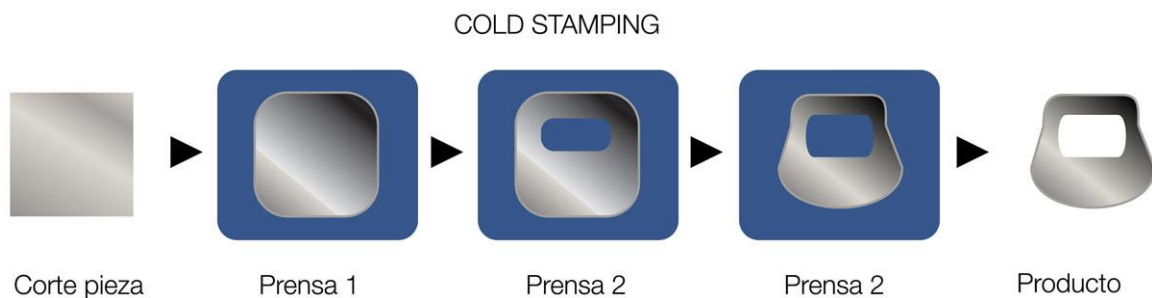


**Figura 6.2:** Esquema del proceso de estampación en caliente para piezas estructurales de vehículos.

Por eso actualmente la estampación en caliente es una de las mejores soluciones para el aligeramiento de peso de las piezas estructurales y la carrocería exterior de los vehículos terrestres y aéreos, ya que mejora el comportamiento en caso de colisión y garantiza la seguridad del pasajero a un menor peso y tiempo de producción.

### 6.3.2. Estampación en frío

La estampación en frío se trata de una tecnología que permite fabricar una amplia variedad de piezas, como pequeñas partes de refuerzo de piezas estructurales de vehículos, grandes piezas de carrocería o incluso portones. Este tipo de proceso de conformado destaca por la posibilidad de trabajar materiales de alta resistencia y reducir enormemente el peso del vehículo sin necesidad de aplicar TT costosos y sin necesidad de manipular chapas a altas temperaturas (Figura 6.3).



**Figura 6.3:** Esquema del proceso de estampación en frío para piezas estructurales de vehículos.

Requieren de prensas que sean capaces de operar en un rango de fuerza que superen las 2000 toneladas, para poder deformar el material en su estado más duro. Esto implica que muchas veces no es posible deformar completamente el material sin que fracture, ya que las aleaciones metálicas en su estado más duro son al mismo tiempo poco dúctiles y maleables. Por lo que muchas veces sería necesario usar etapas intermedias de calentamiento, relajación de tensiones y recristalización para poder seguir deformando el material, lo que haría que este proceso de conformado perdiera su cualidad más atractiva.

### 6.3.3. Fundición y mecanizado

La fundición es una técnica o proceso de fabricación de aleaciones metálicas que consiste en fundir el metal e introducirlo en una cavidad llamada molde con la forma final de la pieza donde se solidifica. Puesto que el aluminio presenta un bajo punto de fusión, sería un proceso menos costoso que con otros metales. Además, la fundición permite crear piezas con geometrías muy complejas y radios pequeños, pero presenta una serie de problemas.

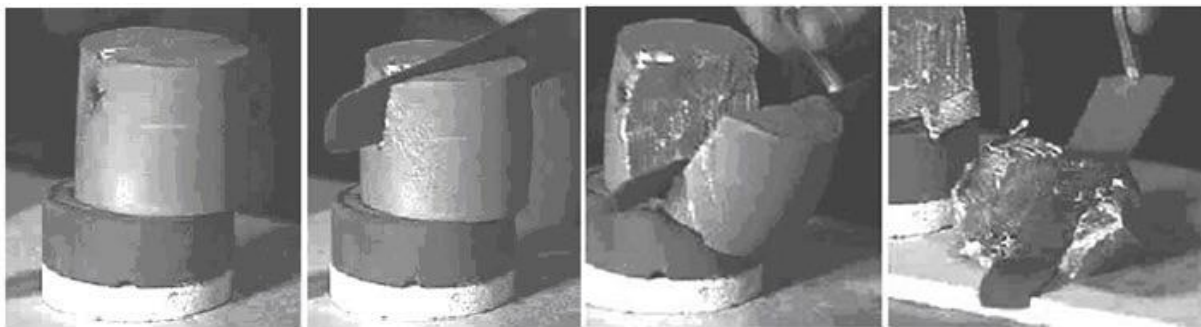
Muchos de los grandes defectos están asociados a la fusión del metal. El metal al solidificarse tiende a contraerse lo que hace que la geometría no sea muy precisa y que se formen poros, bolsas de aire y rechupes dentro de la pieza. De modo que el producto final sería sumamente



frágil y menos resistente que en otros procesos de fabricación. La falta de precisión y tolerancias en la geometría de la pieza requerirían además un mecanizado posterior, aumentando en exceso el coste final del producto.

#### 6.3.4. Tixo-conformado (SSM)

El tixo-conformado o conformado de metales en estado semisólido (SSM, *Semi Solid Metal forming*) es un proceso de conformado de metales no-férreos como aluminio, cobre y muchos otros, que consiste en la combinación de las ventajas de la fundición o moldeo y la forja. Se le conoce con otros muchos nombres como *thixo-forming*, *thixo-casting*, *rheovasting* o *thixo-molding*. Recibe el nombre debido a que el metal conformado presenta un comportamiento tixotrópico, es decir, que los metales en este estado se cizallan cuando fluyen, pero en estado de reposo presentan cierta resistencia y consistencia (Figura 6.4).



*Figura 6.4: Antigua secuencia fotográfica mostrando el comportamiento tixotrópico de una AA en estado semi-sólido.*

Este comportamiento se obtiene al calentar la aleación entre las temperaturas "*liquidus*" y "*solidus*" de su diagrama de fases, conteniendo así entre un 30 y 60 % de sólido. Este potencial permite por lo tanto conformar las piezas tal y como se harían en forja, pero con un único golpe de prensa, ahorrando tiempo y dinero. Pero este proceso altera levemente las propiedades finales del material, por lo que no es el ideal para la fabricación de piezas estructurales de alta resistencia. En el caso de las AA, las piezas típicamente fabricadas mediante el tixo-conformado son los soportes de transmisión, bloques de motor y filtros de bombas de aceite.

Por las razones que se acaba de señalar se dispone de 4 principales y posibles alternativas para la resolución del conformado de este trabajo. El interés del **conformado en frío** reside en que es una técnica menos costosa, ya que no es necesario calentar las piezas y las propiedades

mecánicas del material son ejemplares, por lo que es ideal para la fabricación de piezas resistentes para componentes ligeros. Pero la leve complejidad y los pequeños radios de las estructuras de coche hacen que mediante esta técnica las AAAR fracturen y que se necesiten fuerzas de conformado mayores. Las **piezas fundidas y mecanizadas** suelen usarse para moldear formas más complejas que requieran de menores prestaciones mecánicas. Las estructuras ligeras de coche no son de una complejidad elevada, pero sí que precisan de muy buenas prestaciones mecánicas para garantizar la seguridad de los pasajeros en caso de accidente. El **tixo-conformado**, en cambio, presenta una excelente relación en cuanto a complejidad geométrica y propiedades mecánicas, ya que es una combinación entre la forja y la fundición. Aun así, mediante esta técnica de fabricación no se alcanzan las prestaciones necesarias para aplicarlas en estructuras de vehículos.

A pesar de que el **conformado en caliente** presenta problemas de *galling*, costos por los TT y la manipulación de las chapas en caliente, si los parámetros de dichos tratamientos se optimizan adecuadamente, puede ser una alternativa muy viable para la fabricación de piezas de alta resistencia que requieran de un bajo peso. Por tanto, la alternativa seleccionada para la fabricación de piezas estructurales ligeras y de alta resistencia para vehículos, será la de conformado en caliente y sus tres variantes antes mencionadas: *Hot Stamping* tradicional, *Warm Forming* y conformado en estado *W-temper*.

## 7. EQUIPO DE LABORATORIO Y PROCEDIMIENTOS

En este apartado se explicarán brevemente los equipos de laboratorio y taller empleados en orden de ejecución, sus características más importantes y su modo de empleo, así como el procedimiento seguido para la ejecución de cada uno de los tratamientos y procesos. Además, en muchos casos será necesario emplear muestras que deben estar preparadas de una manera específica, por lo que se hará un breve resumen de cómo prepara y tratar dichas probetas o muestras. Entre todos los equipos que se han usado en la Escuela Politécnica Superior de Mondragón (MGEP, *Mondragon Goi Eskola Politeknikoa*), podemos encontrar máquinas de taller como el centro de mecanizado, cizalladoras, sierras y distintos tipos de hornos eléctricos industriales entre otras muchas máquinas, o también podemos encontrar máquinas y equipos complejos de laboratorio como el equipo de indentación para medir micro-durezas, maquinas universales de tracción y compresión, microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscope*), lijadoras y pulidoras, cortadoras y máquina de calorimetría diferencial de barrido (DSC, *Differential Scanning Calorimetry*).

### 7.1. Centro de mecanizado con CNC

El centro de mecanizado con Control Numérico por Computadora (CNC, *Computer Numerical Control*) es empleado para la mecanización de las probetas de los ensayos de tracción. Dichas probetas tienen una forma ya normalizada, según el tamaño de la probeta que se quiera ensayar. En este caso, dependiendo del procedimiento que se quiera seguir, han sido mecanizadas dos tamaños de probetas durante todo el proyecto, una de 200 mm y otra de 100 mm de largura.



**Figura 7.1:** Centro de mecanizado LAGUN FE05 L1000 con CNC de la MGEP.

Antes de introducirlas al centro de mecanizado, las probetas deben ser cortadas a sus medidas principales, de modo que se han usado las chapas en estado de compra y se han cortado en la cizalla hidráulica *Nargesa C-2006* con CNC (Disponible en Anexos). A continuación, las probetas pre-cortadas son introducidas en el centro de mecanizado junto con el diseño 3D por ordenador para obtener la geometría exacta definida según la norma (Diseño 3D y medidas normalizadas disponibles en Anexos).

## 7.2. Hornos de mufla

Para llevar a cabo los tratamientos térmicos se han usado tres hornos, dos hornos eléctricos de *Nabertherm* (Disponible en Anexos) de alta temperatura para los tratamientos térmicos de solución, uno con ventilador ( $T_{\max}=850^{\circ}\text{C}$ ) y otro sin ventilador ( $T_{\max}=1400^{\circ}\text{C}$ ), y otro horno eléctrico de *J.P. Selecta S.A* (Disponible en Anexos) con ventilador de baja temperatura ( $T_{\max}=250^{\circ}\text{C}$ ) para los envejecimientos. Las dos muflas de alta temperatura están equipadas con ruedas para poder transportarlos a cualquier zona del laboratorio según los experimentos que se quieran realizar. Normalmente se suelen situar cerca del horno de envejecimiento o de la maquina universal de tracción para no perder tiempo.

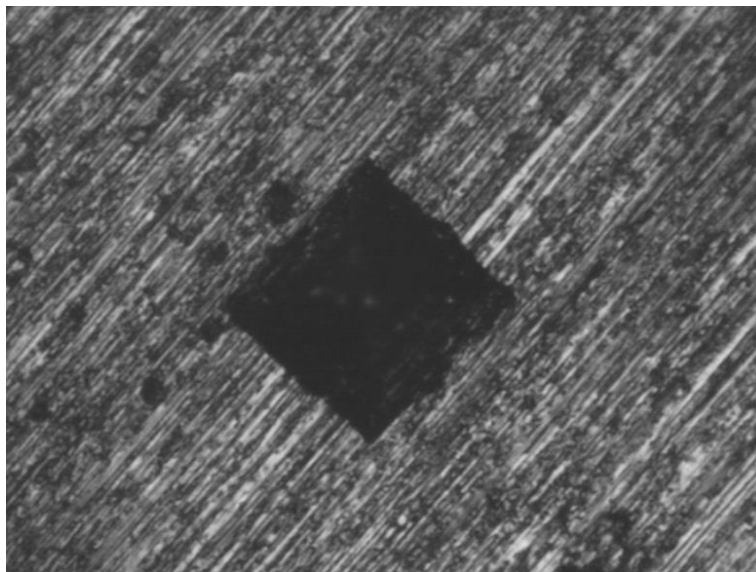
Modelo	$T_{\max}$ [°C]	Dimensiones Internas [mm]			Vol. [l]	Dimensiones Externas [mm]			Potencia calórica [KW <sup>2</sup> ]	Conexión eléctrica	Peso [Kg]
		Anch.	Prof.	Alt.		Anch.	Prof.	Alt.			
N250/85HA	850	600	750	600	250	1002 + 255	1636	1860	21	Trifásica	610
LH60/14	1400	400	400	400	60	790	1080	1370	12	Trifásica	300
2002972	250	600	600	800	288	1120	840	1070	6	Monofásica	-

**Tabla 7.1:** Características generales de los tres hornos empleados para los TT.

Las probetas son introducidas en los hornos con ayuda de unas pinzas largas para altas temperaturas y dos pares de guantes protectores de alta temperatura también. Debido al pequeño tamaño de las probetas, se colocan unos bloques cerámicos dentro del horno que sirven como apoyo, para así facilitar la extracción de las muestras con las pinzas. Normalmente, cuando las probetas requieren de un temple, se coloca un cubo de agua al lado del horno para realizar el temple dentro del tiempo establecido en el protocolo (tiempo de transferencia de 7 segundos).

### 7.3. Durezas

Las mediciones de las durezas del material se efectúan mediante la indentación a nivel microscópico. Esto se realiza con el durómetro *ZHV10 Vickers de Zwick Roell* (Disponible en Anexos). Esta máquina está equipada con una punta rómbico de diamante, que ejerce una cierta presión sobre la superficie del material produciendo un surco característico (Figura 7.2). Después, las dimensiones de ese surco son medidas con la ayuda de un microscopio, para así determinar la dureza del material. Cuanto más duro sea el material, menor surco dejará tras de sí la punta de diamante. El peso empleado sobre dicha punta es de 0,3 Kg, y el objetivo usado en el microscopio es un objetivo 1:40, es decir, de 40 aumentos.



**Figura 7.2:** *Indentación o surco característico de forma rómbica realizado con el durómetro sobre la superficie pulida de AA.*

Antes de realizar la medición, se debe lijar y pulir el material en la superficie en la que se quiere realizar la medición de la dureza. Normalmente estas durezas se miden en el centro de la probeta al largo de su espesor, ya que es la zona con menor dureza y la más conservadora. Para ello, se corta la muestra a lo largo, se emplean lijas de distintos granos en una lijadora automática y se va reduciendo el tamaño de grano de la lija gradualmente. Por último, se pule el material con un paño especial en la misma lijadora automática con ayuda de un líquido que contiene partículas de diamante, para así, obtener un acabado espejo en el material y poder realizar una medición exacta de la dureza. Si el lijado y el pulido no se realizan adecuadamente, podría haber dificultades para analizar la micro-indentación en el microscopio por culpa de imperfección, topografía irregular o caras inclinadas.

## 7.4. Ensayos de tracción

Después de que las probetas hayan sido mecanizadas, dichas probetas se lijan levemente a mano para deshacerse de cualquier rebarba que pueda haber quedado en el proceso de mecanizado. A continuación, con ayuda de un calibre micrométrico se mide la sección de la probeta y se anota en una hoja de Excel. Después de ajustar las mordazas y el extensómetro encargado de medir la elongación de la probeta, se introduce y se alinea la probeta en las mordazas. El ensayo de tracción se realiza a una velocidad de deformación de 3,5 mm/min en una máquina de ensayos universal de *Zwick Roell* de 5 toneladas de fuerza (Figura 7.3). Una vez se hayan realizado todos los ensayos pertinentes, se exportan las curvas de fuerza y deformación, para después tratarlas en Excel y calcular las curvas y deformaciones reales partiendo de los valores ingenieriles (Formulas y cálculos disponibles en anexos).



*Figura 7.3: Máquina de tracción universal de Zwick Roell de 5 toneladas de fuerza de la MGEP.*

## 7.5. Ensayos de compresión en prensa

Los ensayos de compresión para simular el temple en prensa se realizan en una máquina de ensayos universal como la anterior, pero con una fuerza de 10 toneladas. La diferencia es que, en este caso, en vez de usar mordazas, se hace uso de unos platillos que actúan como troqueles planos. Debajo del troquel plano inferior se coloca un bloque aislante térmico de Mica de 20 mm de espesor, que además actúa como amortiguamiento durante la compresión.

Los ensayos de temple bajo presión que se han realizado, han sido llevados a cabo en 3 presiones distintas, por lo que se debe tener en cuenta la geometría de la probeta para calcular la fuerza necesaria para alcanzar dichas presiones (Cálculo disponible en Anexos). La probeta empleada en este caso es la pequeña de 100 mm de largura, para que sea más manejable y el troquel no se caliente en exceso.

## 7.6. Micrografía y estudio en SEM

El estudio de la micrografía de las probetas se ha efectuado mediante el microscopio electrónico de barrido o SEM, un *Nova NanoSEM 450* (Figura 7.4). Este microscopio es capaz de producir imágenes de resolución nanométrica de una superficie empleando las interacciones que se dan entre electrones y materia. A diferencia de los microscopios ópticos convencionales que usan haces de luz para producir imágenes, el SEM emplea haces de electrones para formar imágenes. Este haz de electrones barre la superficie de la muestra, y en respuesta, este material reemite los electrones en otras direcciones y con otras cargas. Estas partículas son captadas por sensores que hacen que sea posible la reconstrucción de una imagen tridimensional muy precisa.

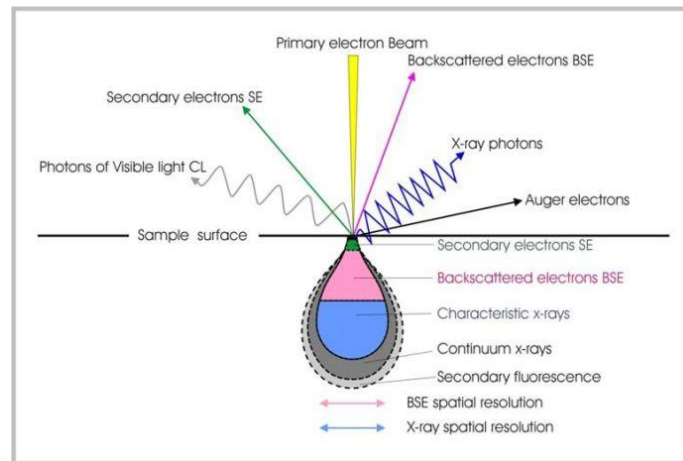


**Figura 7.4:** *Microscopio Nova NanoSEM 450 de la MGEP.*

Dependiendo del material con el que interactúen los electrones, las partículas reemitidas actúan de distinta forma, por lo que no solo es posible obtener una imagen en base a una tipografía, sino en base a una composición química, por lo que este microscopio es altamente



versátil. Además, como se muestra en la siguiente imagen (Figura 7.5), gran parte de los electrones penetran dentro de la muestra, por lo que la lectura de la composición no es únicamente superficial, sino que abarca una zona en forma de gota de agua por debajo de la superficie.



**Figura 7.5:** Penetración de los electrones dentro de la muestra durante un estudio de micrografía con el SEM.

La preparación de las muestras requiere de un lijado y pulido muy fino con el mismo método antes empleado, pero esta vez la muestra debe estar engastada en una pieza cilíndrica a base de resina termo endurecida (Figura 7.5). De esta forma, se garantiza que la muestra se sujete con firmeza dentro del microscopio y obtener así, imágenes de muy alta calidad.



**Figura 7.6:** Muestras de AA7075 y AA6082 pulidas con un acabado espejo engastadas en resina negra termo-endurecida.



## 7.7. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido (DSC, Differential Scanning Calorimetry) es una técnica termo-analítica en la que se miden las diferencias de calor, en base a una temperatura, entre una muestra de referencia y la muestra que se desea analizar. Gracias a esta máquina, es posible determinar el  $C_p$  en función de la temperatura de un material, puntos de fusión de distintos constituyentes dentro del propio material, cristalizaciones y otros muchos parámetros. Básicamente, el DSC es capaz de medir todos aquellos parámetros que tengan alguna relación con los cambios en la entalpía, pudiendo medir tanto procesos endotérmicos o exotérmicos.



**Figura 7.7:** DSC STA 449 F3 de Jupiter de la MGEP ( $T^a = -150^{\circ}\text{C} / 2400^{\circ}\text{C}$ )

En el DSC se introducen dos crisoles que pueden ser de platino, Ytria o de Alúmina como en este caso. Uno de esos crisoles está vacío y servirá como muestra de referencia, y en el otro crisol se introducirán entre 50 y 100 mg del material a estudiar. El DSC aplica calor localizado a ambas muestras e intenta mantener la temperatura de ambas muestras iguales a través de la lectura de unos termopares instalados en sus bases. Para ello, será necesaria aumentar o disminuir el flujo de calor en el crisol de la muestra según se vayan produciendo las reacciones. Por lo que el DSC, cuantifica dichas variaciones en el calor y las representa en una gráfica. Es decir, el principio básico subyacente a esta técnica es que, cuando la muestra experimenta una transformación física, tal como una transición de fase, se necesitará que fluya más (o

menos) calor a la muestra que a la referencia para mantener ambas a la misma temperatura, y esto depende de si el proceso es endotérmico o exotérmico.

Antes de introducir las muestras en el horno del DSC se debe realizar una purga y limpieza del horno introduciendo gases inertes como el N<sub>2</sub> y Ar alternadamente con vacío. Este proceso debe ser repetido un mínimo de tres veces para garantizar la completa limpieza del horno. Una vez introducidas las muestras, el DSC las pesa y tara automáticamente para comenzar el ensayo definido con las rampas de calentamiento. La secuencia de ensayo definida es la siguiente:

1. Temperatura inicial: **22- 23 °C**
2. Rampa ascendente: **a 10 °C/min hasta 700 °C**
3. Mantenimiento: **a 700 °C durante 5 minutos**
4. Temperatura de emergencia: **750 °C**
5. Fin de ensayo (Enfriamiento automático hasta temperatura ambiente)

## 8. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

A continuación, en este apartado se procederá a explicar el documento de la Metodología en el que se resumen los pasos a seguir para la correcta realización de este trabajo, además de una breve explicación de sus componentes principales con los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos. Los resultados han sido explicados junto con la metodología ya que es de suma importancia conocer la solución de cada apartado para comprender el procedimiento seguido. Entre otros términos, el resultado de cada apartado definirá e influirá directamente en los siguientes pasos del procedimiento, ya que dependiendo de estas soluciones se llevarán a cabo unos ensayos u otros.

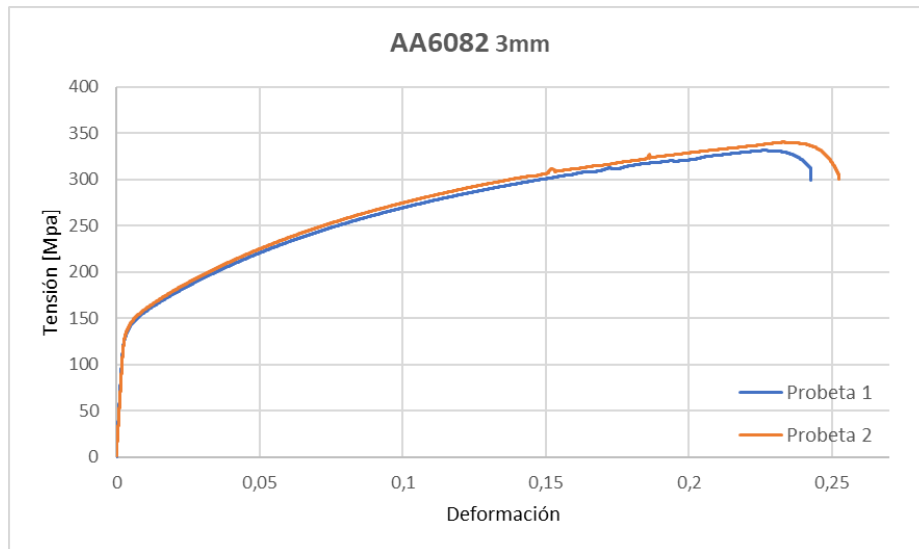
Principalmente hay tres etapas en cuanto a la metodología del trabajo se refiere. Una en la que se realiza la caracterización inicial de las AA en el estado de compra con ayuda de distintos ensayos y métodos avanzados de caracterización. Otra etapa en la que se optimizan los TT con el fin de mejorar el proceso industrial en todos sus aspectos y conseguir unas mejores propiedades del material pasa así, reducir el uso del mismo en los componentes estructurales de los vehículos y aligerar peso con todos los beneficios que eso acarrea. Y la última etapa consiste en analizar el innovador proceso de conformado en caliente en el estado *W-temper*, estudiando la influencia que tienen la deformación y la velocidad de deformación para una aleación específica en este estado y así poder mejorar y optimizar el propio proceso de conformado.

### 8.1. Caracterización del material en estado de compra

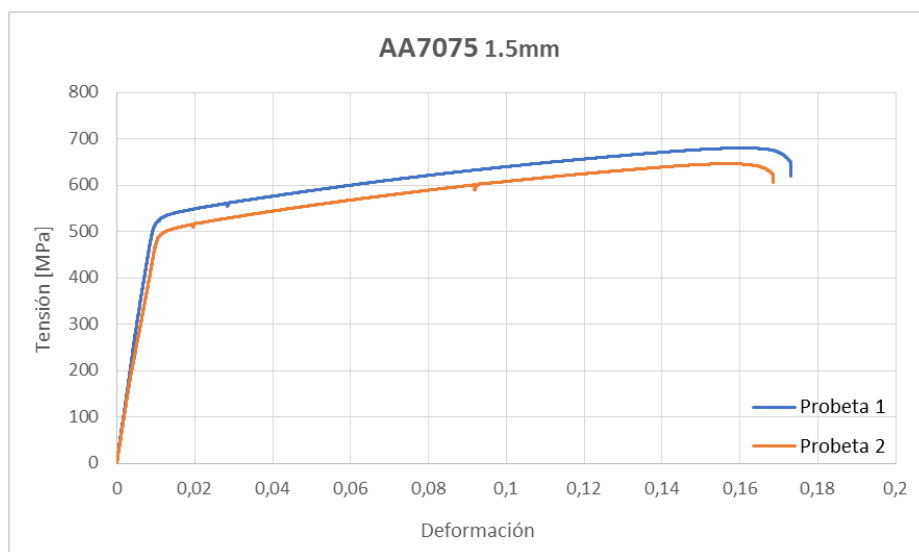
La información reportada a continuación contiene la explicación de un proceso más técnico que los hasta ahora vistos. La correcta caracterización de los materiales en estado de compra definirá los procesos adecuados y muchos de los parámetros necesarios para tratar dichos materiales térmicamente.

Para comenzar con la caracterización de las dos familias de aluminios, las AA6082 T4 y las AA7075 T6, se han comprobado sus resistencias a tracción con la ayuda de una máquina de tracción. Para ello primero se han mecanizado varias probetas con una forma ya normalizada de 200 mm de largura. Las probetas han sido cortadas en la dirección de laminación de las chapas de las que se han obtenido, y cada uno de los ensayos realizados en este trabajo presenta estas mismas características. A partir de las curvas de tensión-deformación se verificarán los estados en los que vienen las chapas y se estudiará si cumplen con las propiedades estandarizadas correspondientes a los tratamientos T4 para las chapas de la serie

AA6xxx y a los tratamientos T6 para las chapas de la serie AA7xxx descritos en el estado del arte (Tabla 5.5).



**Gráfica 8.1:** Ensayo de tracción de la AA6082 T4 en estado de compra.

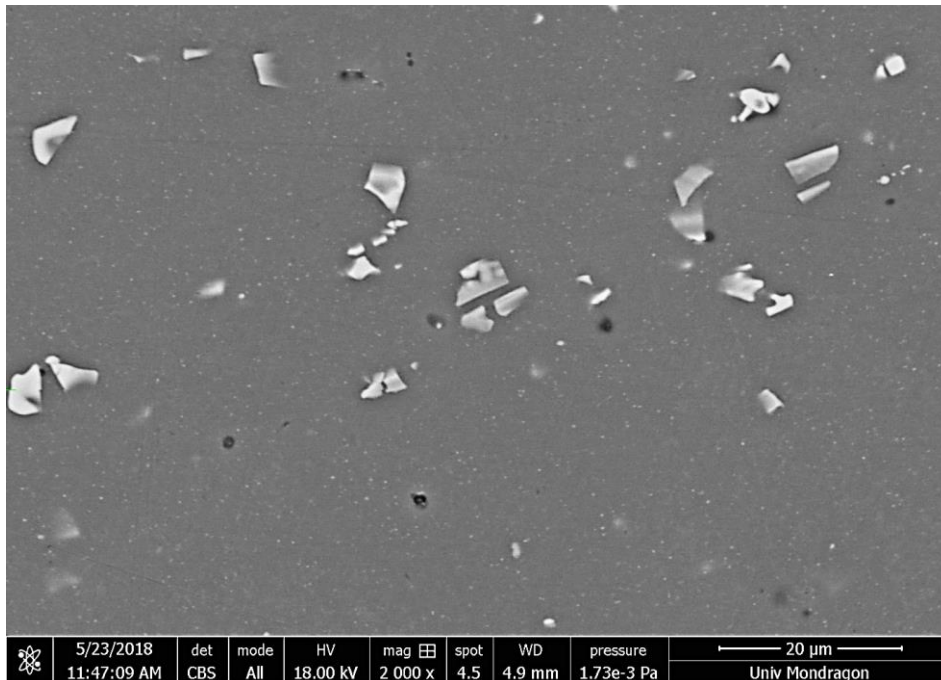


**Gráfica 8.2:** Ensayo de tracción de la AA7075 T6 en estado de compra.

Como se puede observar (Gráficas 8.1 y 8.2), han sido ensayadas dos probetas de cada material para garantizar la repetitividad de los experimentos. La AA6082 T4 presenta una **UTS de unos 340 MPa**, una  $\sigma_y$  (0.2) de unos 145 MPa y una **A50 del 25 %**, valores bastante alto para tratarse de una AA ligera. Sorprendentemente, la AA7075 T6 duplica el valor de UTS de

la anterior serie con valores de casi **700 MPa**, lo que hace de estas AA de las más resistentes entre las aleaciones metálicas de la industria y a la vez, de las más ligeras. Esto supone una enorme ventaja para ser implementadas en estructuras de vehículos.

Aunque ambas AA son extremadamente resistentes para la poca densidad que presentan y cumplen con los valores mínimos normalizados y establecidos en el estado del arte para los tratamientos T4 y T6 [Tabla 5.5], el hecho de que una aleación soporte mayores esfuerzos que la otra puede influir en su futuro conformado. Por lo que es de suma importancia definir la diferencia microestructural entre ellas, para tener una idea de la variación en su resistencia. De modo que se han llevado a cabo estudios de micrografía en el SEM y así, poder analizar la distribución, morfología y tamaño de precipitados, además de su composición química.

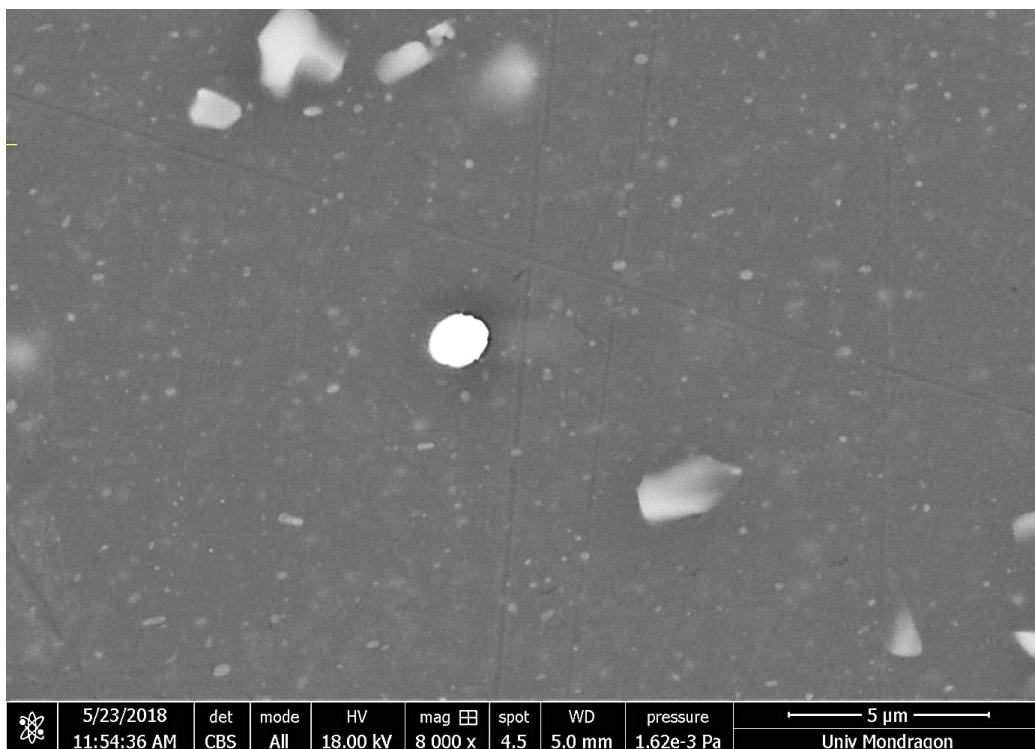


**Figura 8.1:** *Imagen SEM de la AA6082 T4 a 2.000 aumentos*

En la anterior figura (Figura 8.1) se observa la microestructura de las AA6082 T4 a grandes rasgos. Con una visión de 2000 aumentos ya son claramente visibles las dos fases que presentan estas aleaciones. La fase gris corresponde a la matriz blanda compuesta mayormente por aluminio. El resto de fases presentan una luminosidad mayor, por lo que se tratan de elementos más duros con una composición química distintas a la de la matriz. Pero esta segunda fase que se observa no son los precipitados, ya que presentan una distribución heterogénea (apilados por grupos), un tamaño desmesurado (de entre 2 y 10  $\mu\text{m}$ ) y una morfología irregular (formas muy variadas y con aristas afiladas). Por eso, si estos fueran los precipitados fragilizarían el material y serían focos de iniciación de grietas, y ya se ha visto,

que estas AA presentan unas altas resistencias. Por este motivo, pueden tratarse de *clústers* o agrupaciones de constituyentes metálicos sin disolver que pueden reducir ligeramente la resistencia de estas aleaciones. Las fases más oscuras en cambio, representan los poros o vacíos en el material. Los *clústers*, además, presentan un halo oscuro a su alrededor que significa que existe un vacío entre la propia agrupación y la matriz, lo que quiere decir que se trata de *clústers* incoherentes con la matriz.

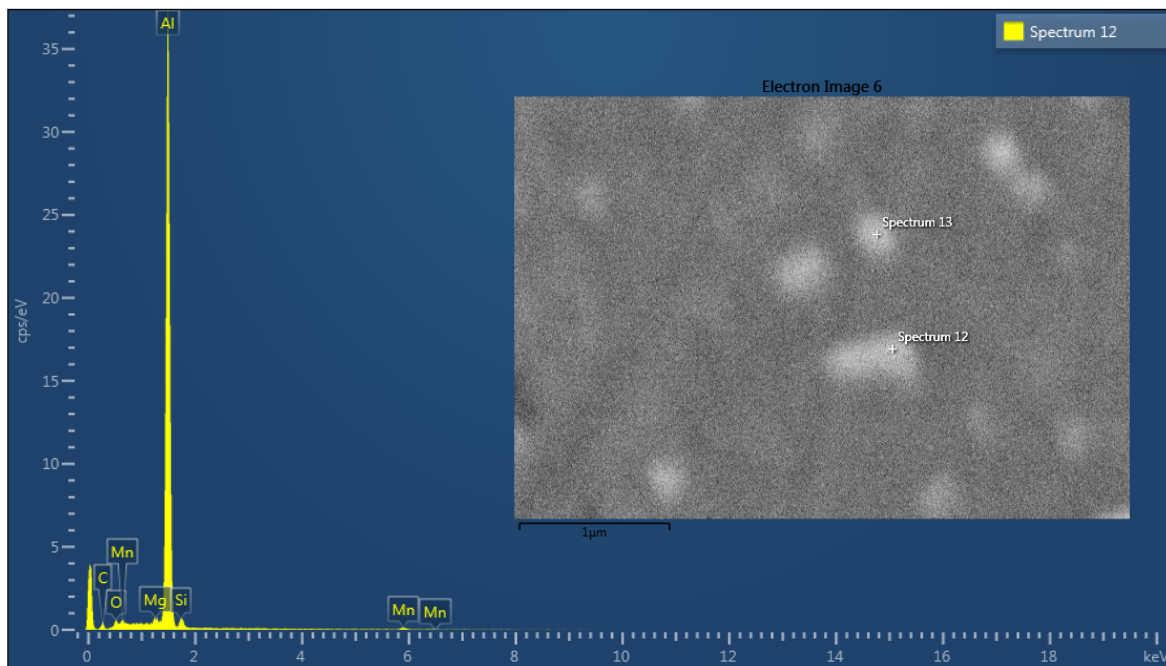
Si se observa más detenidamente la imagen (Figura 8.1), se intuyen unas pequeñas partículas luminosas inmersas en la matriz. Por lo que se ha aumentado la magnitud de visión hasta 8000 aumentos. Como se muestra en la siguiente imagen (Figura 8.2), efectivamente la matriz está cargada de una segunda fase rodeada de *clústers* de mayor tamaño, y esta vez sí, se tratan de precipitados con una distribución más uniforme y homogénea, forma redondeada y regular, y pequeño tamaño (de entre **10 y 60 nm**). Estas cualidades son las que otorgan la resistencia al material, ya que estos precipitados pequeños y duros son los que obstaculizan el avance de las dislocaciones sin ser un foco de concentración de tensiones y sin provocar iniciaciones de grieta.



**Figura 8.2:** Imagen SEM de la AA6082 T4 a 8.000 aumentos

El estudio de la micrografía en el SEM permite, además, analizar la composición química de un punto específico de la imagen y obtener el perfil espectral de los elementos que contiene

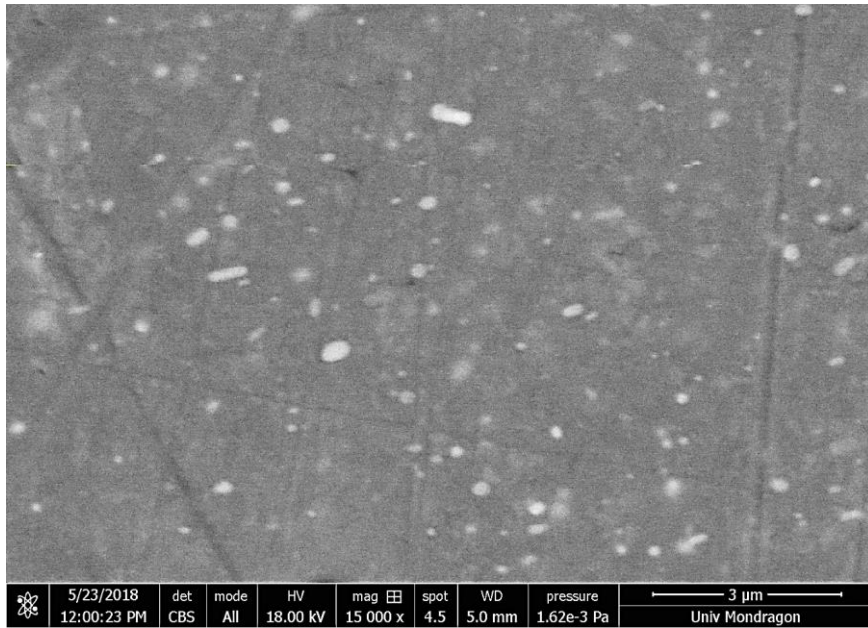
la muestra. En este caso, se ha seleccionado y analizado la composición química de uno de los precipitados de la anterior imagen. Cabe destacar que los electrones, gracias a los que el SEM captura estas imágenes, penetran en la muestra como se ha mencionado en el apartado de “Equipo de laboratorio y procedimientos”, por lo que el estudio de la composición química no es únicamente superficial (Ver figura 7.5). Esto puede ocasionar unos resultados inesperados, ya que se estará analizando parte de la matriz de aluminio que se encuentra debajo del precipitado y no solo el precipitado, como se observa en la siguiente imagen y grafico espectral (Gráfica 8.3). La mayoría de la zona analizada está compuesta por Al, pero existen unos pequeños picos de Mg y Si a su lado, además de otra clase de elementos. Esto quiere decir que el precipitado está formado principalmente de Mg y Si, y el pico de Al y el resto de aleantes corresponden al área que se encuentra debajo del propio precipitado. Por ello la mayoría de los precipitados de las AA6082 T4, contrastándolo con bibliografía externa, seguramente se traten de **Mg<sub>2</sub>Si**, puesto que son sus mayores constituyentes.



**Gráfica 8.3:** Espectro de la composición química de los precipitados de la AA6082 T4.

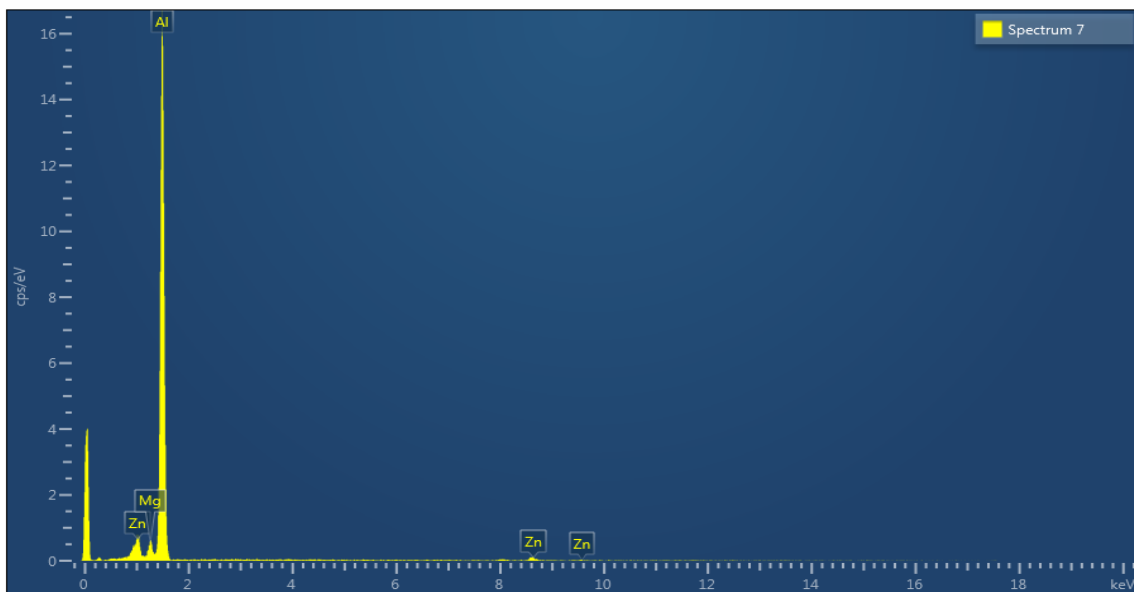
Analizando la AA7075 T6 a valores de 15.000 aumentos, se observan precipitados con la misma morfología y distribución que en la serie anterior, pero con un tamaño algo menor (de entre 1 y 50 nm). Además, estas aleaciones no presentan tantos *clústers*, debido a que su segundo elemento principal es el Zn, y la solubilidad del Zn en el Al es muy elevada. La ausencia de *clústers* y el hecho de que los precipitados sean de menor tamaño, puede que sean unas de las razones por las que estas aleaciones presentan mayor resistencia que el resto de las series de AA.





**Figura 8.3:** Imagen SEM de la AA7075 T6 a 15.000 aumentos

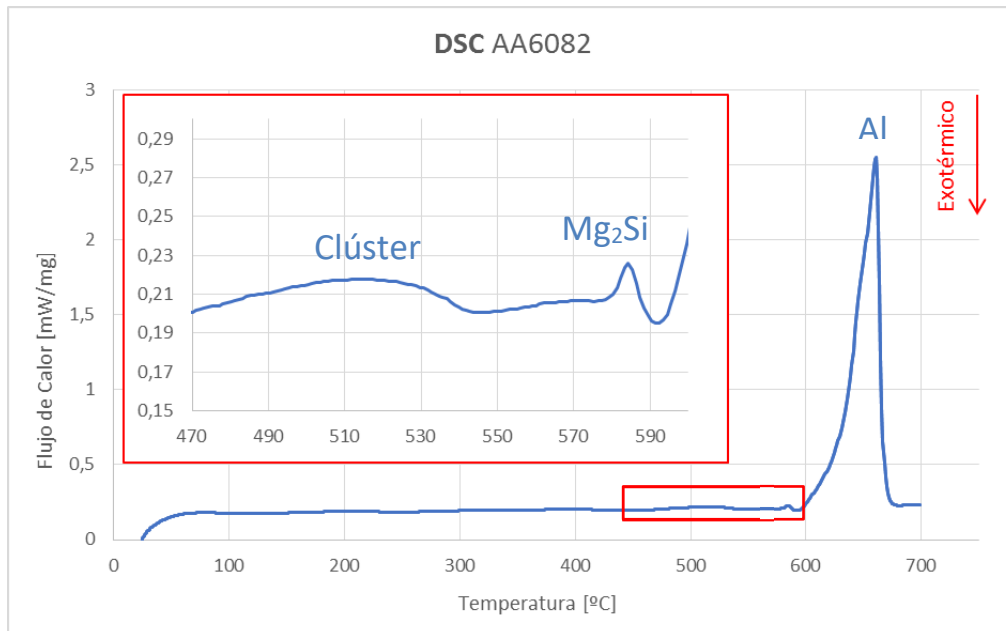
Del mismo modo que en la anterior AA, se ha analizado la composición química de los precipitados de la AA7075 T6 (Gráfica 8.4). En este material también se puede observar un pico predominante de Al seguido de dos pequeños picos de Zn y Mg, como es lógico, ya que son los dos mayores constituyentes de estas aleaciones. Por lo que seguramente se traten de precipitados de **MgZn<sub>2</sub>** dispersos en una matriz formada de Al entre otros muchos constituyentes.



**Gráfica 8.4:** Espectro de la composición química de los precipitados de la AA6075 T6.



El último paso para terminar con la caracterización de los materiales en estado de compra, es determinar la temperatura a la que funden esos precipitados para que se disuelvan en la matriz, y favorecer así un SHT óptimo y completo. Por lo que se han llevado a cabo ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) en muestras de ambas series.

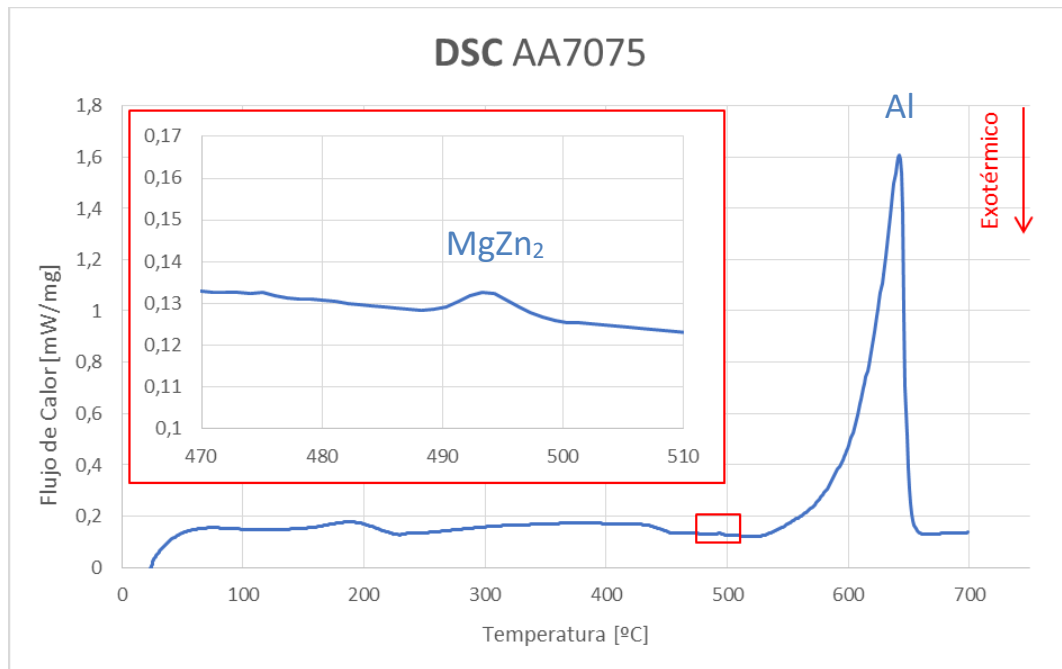


**Gráfica 8.5:** *Ensayo en el DSC de la AA6082 T4.*

Como se observa en la anterior grafica (Grafica 8.5) correspondiente a la AA6082 T4, existe un pico endotérmico dominante entre los **590 y 660 °C**. Este pico endotérmico determina el calor absorbido por la muestra durante el proceso de fusión de la matriz de Al, por lo que este pico corresponde a la fusión del Al. En cambio, se observan otros pequeños picos antes de llegar a esta temperatura de fusión. Estos picos representan la temperatura a la que funden el resto de fases de la AA, entre las que se encuentran los *clústeres* y los precipitados principales. Ya que el volumen de *clústeres* es mayor, su pico de fusión debería de ser más notable que el de los pequeños precipitados de **Mg<sub>2</sub>Si**, por lo que se deduce que el primer pico alargado entre los **470 y 530 °C** corresponden a los grandes *clústeres* y el pequeño pico que viene a continuación a una temperatura de **580 °C** es el de los **precipitados**. Puede que el hecho de que los *clústeres* sean incoherentes con la matriz sea una de las razones por la que estos funden antes que los precipitados, que están mejor incrustados en la matriz, aunque no sean coherentes con ella completamente.

De modo que se deduce que para una completa fusión de los precipitados será necesaria una temperatura de unos 580 °C, pero esta temperatura es muy próxima a la fusión del aluminio y podría perjudicar la integridad estructural y geometría de la pieza. Bastaría con una

temperatura suficientemente alta para favorecer la difusión de los elementos de los precipitados en la matriz, sin necesidad de llegar a su temperatura de fusión, y así cumpliríamos uno de los objetivos de optimizar los TT sin necesidad de emplear temperaturas tan altas. Por lo que puede que las temperaturas antes descritas en el estado del arte de unos **550 °C** sean suficientes para el SHT completo y óptimo en las AA6082 T4. Además, el hecho de que estos precipitados no sean totalmente coherentes con la matriz facilita su difusión en esta.



**Gráfica 8.6:** *Ensayo en el DSC de la AA7075 T4.*

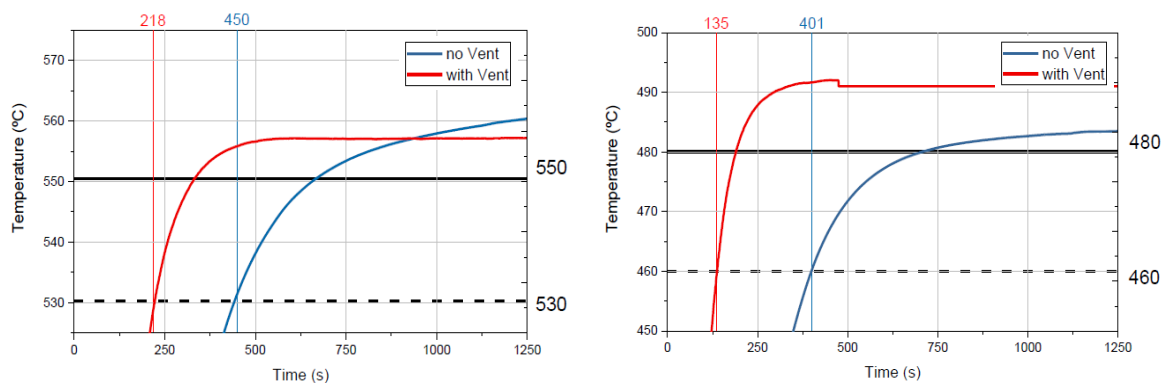
De la misma manera, analizando el DSC obtenido de la AA7075 T6 (Gráfica 8.6) se observa la presencia de un pico de fusión del Al y otro pico anterior correspondiente a los precipitados de **MgZn<sub>2</sub>**, además de otros picos correspondientes al resto de constituyentes que componen los *clústeres*, esta vez menos notables que en la anterior aleación. El pico endotérmico de los precipitados de esta serie se manifiesta entre **490 y 500 °C**, por lo que esta es su temperatura de fusión completa. Pero como bien se ha descrito antes, no será necesario llegar a estas temperaturas durante el SHT para difundir estos elementos en la matriz, bastara con unos **480 °C** como bien se ha definido en el estado del arte, lo que contribuye con la optimización del TT.

## 8.2. Optimización del tratamiento térmico

La optimización del TT puede que se trate de uno de los factores más importantes de este trabajo. Gracias a los ensayos aquí descritos, será posible ahorrar tiempo y dinero gracias a la correcta elección del horno y el estudio de la pieza dentro de este, así como establecer un protocolo óptimo para cada uno de los parámetros de todos los tratamientos térmicos.

### 8.2.1. Estudio del calentamiento del horno y la pieza

Para comenzar a optimizar los tratamientos térmicos será necesario primero elegir el horno adecuado para realizar los tratamientos. Se va a partir de unos hornos eléctricos de resistencia con y sin ventilador. Con ayuda de unos termopares insertados en las probetas a través de unos pequeños agujeros en su grosor que llegan hasta el centro de la pieza, se introducirán en ambos hornos y determinará cuál de los dos responde mejor para estos tratamientos.

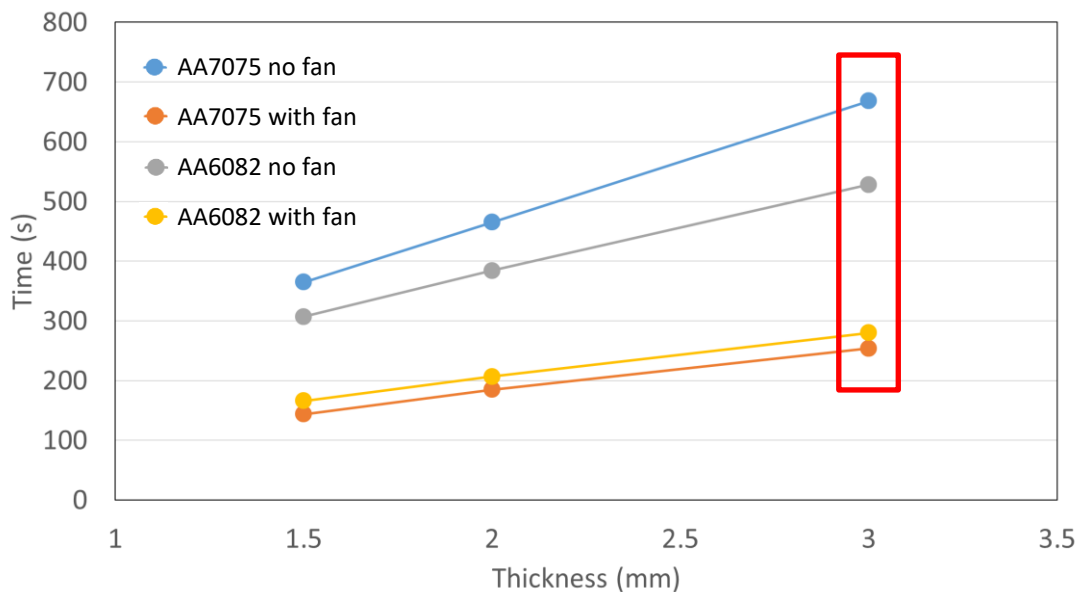


**Gráfica 8.7 (Izq) y Gráfica 8.8 (Der): Comparación de perfiles térmicos en horno con y sin ventilador de las AA6082 T4 (Izq) y AA7075 T6 (Der)**

Las anteriores graficas (Graficas 8.7 y 8.8) muestran los valores tomados por esos termopares dentro de la pieza que se encuentra en el horno y muestran el perfil térmico a lo largo del tiempo. Se han empleado las AA6082 T4 y las AA7075 T6, y se les ha aplicado un SHT (cada uno a su temperatura de solución) para registrar el perfil térmico en el interior de la pieza, en el horno con ventilador y sin ventilador. Se puede observar como el horno con ventilador calienta la pieza con mayor rapidez, ya que además de transmitir el calor por radiación, lo hace por convección. Se han establecido valores de temperatura 20 °C inferiores a las temperaturas de SHT para comparar los resultados. La AA6082 alcanza los 530 °C en el horno con ventilador en tan solo **218 segundos**, mientras que en el horno sin ventilador lo hace en más del doble, en **450 segundos** para ser exactos. La AA7075 en cambio, alcanza los 460 °C en el horno con

ventilador en solo **135 segundos**, mientras que en el horno sin ventilador lo hace en bastante más del doble, en **401 segundos**. Así pues, queda claro que el horno con ventilador calienta el doble de rápido la pieza que el que carece de ventilador, lo que supone un ahorro energético considerable, ya que la pieza permanece en el horno la mitad de tiempo.

Pero el grosor de la pieza influye notablemente en el calentamiento, ya que el flujo de calor tarda más tiempo en llegar al interior de la pieza cuanto más gruesa sea esta. Por lo que se han tomado distintos grosores de ambos materiales y se han repetido estos ensayos en cada uno de ellos, como se observa en la siguiente gráfica (Gráfica 8.9). Esta muestra que cuanto mayor sea el grosor de la pieza, mayor será el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de SHT, como es lógico, y que, además, al igual que en los ensayos anteriores, el horno con ventilador favorece este calentamiento. En este caso, para un grosor de 3mm, la AA7075 necesitaría alrededor de 250 segundos (**4 minutos y 10 segundos**) para alcanzar su temperatura de SHT (480 °C) y unos 280 segundos (**4 minutos y 40 segundos**) en el caso de la AA6082 para alcanzar su temperatura de SHT (550 °C).



**Gráfica 8.9:** *Tiempos para alcanzar la temperatura SHT con distintos grosores en AA6082 T4 y AA7075 T6.*

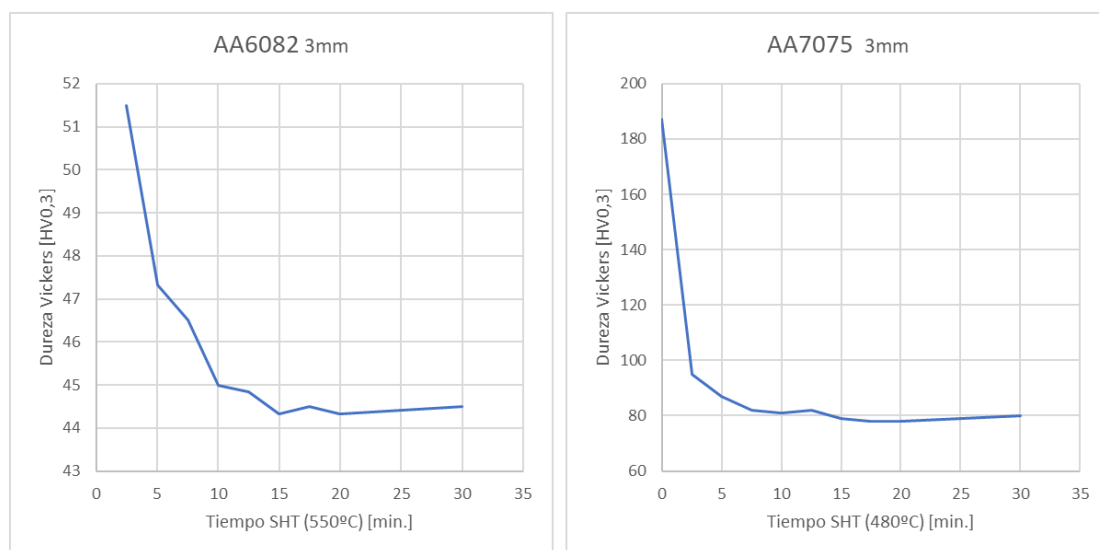
Esta diferencia del tiempo en el que alcanzan la temperatura de SHT es menos notoria con pequeños espesores, por lo que se ha decidido a partir de ahora emplear únicamente grosores de 3 mm. Estos grosores afectan en mayor medida a la diferencia de resultados. En consecuencia, estos resultados serán más conservadores y no será necesario repetir los mismos procedimientos en pequeños grosores.

## 8.2.2. Ajuste de parámetros de los tratamientos térmicos

Una vez establecido que el horno con ventilador responde con mayor rapidez que sin ventilador para el calentamiento de piezas, y que el grosor de estas presenta una influencia considerablemente en su temperatura, es hora de fijar el resto de parámetros como tiempos, temperaturas, presiones y medios de temple para un tratamiento óptimo, rápido y de bajo coste, así como el efecto que estos parámetros tienen en las propiedades finales del material.

### 8.2.2.1. SHT óptimo

La primera etapa del TT completo de las AA consiste en disolver los precipitados con ayuda de un tratamiento térmico se solución o SHT. Ya se ha visto cuales son las temperaturas con las que se consigue esto para cada AA y el tiempo necesario para que las piezas alcancen esta temperatura en su interior. Solo queda ver si efectivamente después de este tiempo se consigue un estado *W-temper* completo y blando.



**Gráfica 8.10 (Izq.) y Gráfica 8.11 (Der.): Durezas-Vickers después de distintos tiempos de SHT en las AA6082 (Izq.) y AA7075 (Der.).**

Para ello se han introducido en el horno varias probetas de cada AA. Cada una de ellas ha sido extraída a un tiempo distinto y templada en agua. Seguido, antes de que el material comience a envejecer naturalmente, las muestras han sido lijadas y pulidas, para poder realizar los ensayos de dureza correspondientes. Los ensayos de dureza que se han realizado han sido ensayos de micro-dureza Vickers. En las anteriores gráficas (Gráficas 8.10 y 8.11) se muestra cómo cuanto más tiempo de SHT se le aplique al material, menos duro es este, ya que los

precipitados que otorgan la dureza al material se están disolviendo en la matriz. La AA6082 presenta un valor de dureza aceptablemente bajo de unos **44,5 HV0.3** a los **15 minutos** de ser tratado térmicamente en el horno a una Temperatura de 550 °C. Por otro lado, la AA7075 presenta un valor de dureza de **80 HV0.3** y estable a los **7 minutos** de ser tratado a 480 °C, pero superior a la anterior AA.

Según el estudio de calentamiento de pieza en horno realizado en el anterior apartado, se llegaba a la temperatura de SHT en algo menos de 5 minutos para ambos materiales. Pero el hecho de que hayan llegado a esta temperatura no significa que los precipitados se hayan disuelto. Para ello, se debería haber establecido la temperatura de fusión de los precipitados obtenida con el DSC como la temperatura de SHT. En este caso, se ha empleado una temperatura ligeramente inferior, como bien se ha mencionado antes, para evitar la fusión del Al y optimizar el proceso reduciendo la temperatura del horno. De modo que las piezas necesitan más de 5 minutos para que sus constituyentes se difundan completamente en la matriz y así, llegar a una solución total. Esta difusión completa tarda más en la AA6082 T4 que en la AA7075 T6, ya que la que esta tratada con un tratamiento T4 presenta más precipitados y de mayor tamaño que en caso de la que esta tratada con un T6. Resumiendo, los precipitados de mayor tamaño, tardan más en disolverse que los de pequeño tamaño y por eso las AA6082 T4 necesitan mayores tiempos de SHT.

### 8.2.2.2. Envejecimiento

El tratamiento de precipitación o envejecimiento consiste en hacer crecer los precipitados con una morfología, tamaño y dispersión específica partiendo del estado *W-temper* para aumentar las propiedades mecánicas de la pieza final. Este aumento de precipitados se puede dar de forma natural o artificial. En este apartado se realizarán las pruebas pertinentes para definir los tiempos de envejecimiento ideales para optimizar el TT y obtener una pieza final con los mejores resultados. Además, el estudio del envejecimiento natural facilitará información sobre el almacenaje de estas AA.

#### 8.2.2.2.1. Envejecimiento Natural

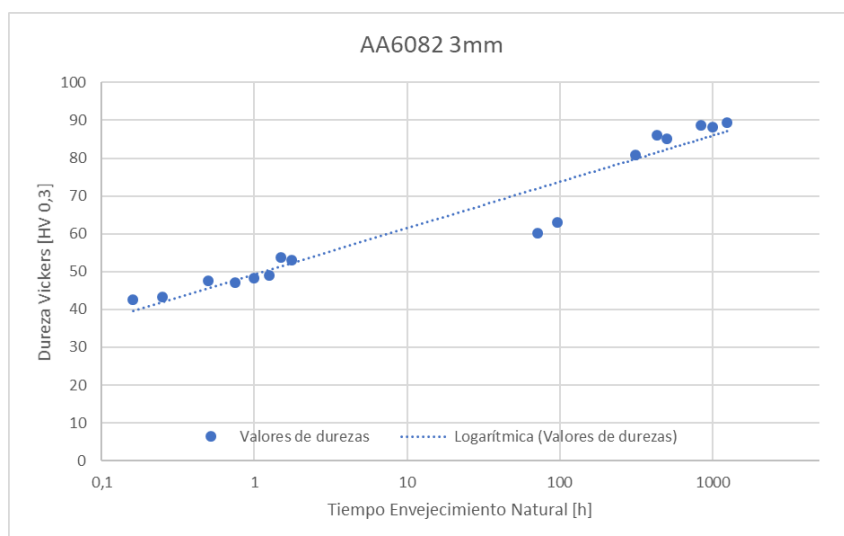
El primer parámetro a determinar en cuanto al envejecimiento natural se refiere, es en cuanto tiempo comienza a endurecer el material desde que es templado a un estado *W-temper*. Este dato es de suma importancia para el proceso de conformado en este estado, ya que se necesita que el material no haya empezado a endurecer para así, poder conformarlo en frío sin necesidad de emplear grandes fuerzas y con mayor ductilidad. Como se observa en la siguiente gráfica (Gráfica 8.12), la AA6082 comienza a endurecer inmediatamente después del

temple. En apenas 1 h su dureza ha aumentado en una magnitud de **15 HV0.3** hasta los **70 HV0.3**, lo que puede llegar a ser asumible para el proceso de conformado.



**Gráfica 8.12:** *Aumento de la dureza durante 1h en el estado W-temper por envejecimiento natural en la AA6082.*

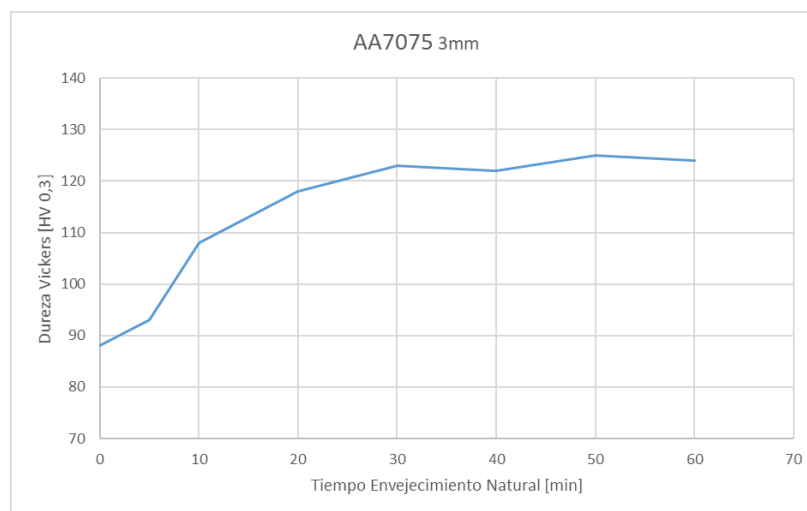
Pero más allá de estos tiempos, puede llegar a ocasionar problemas por el excesivo aumento de dureza, y como consecuencia, pérdida de ductilidad para el conformado. En la gráfica (Gráfica 8.13) se puede ver la continuación de este endurecimiento a tiempos mayores. Se ha decidido usar la escala logarítmica en el eje del tiempo, para así tener una mejor visión del aumento de sus durezas.



**Gráfica 8.13:** *Aumento de la dureza durante 52 días en el estado W-temper por envejecimiento natural en la AA6082.*

Este material de maduración lenta, sigue aumentando su dureza incluso a los **52 días** desde su temple. Lo que puede favorecer su almacenaje hasta obtener la resistencia y la dureza deseada. En este lapso de tiempo, la AA6082 ha aumentado su dureza en una magnitud mayor a la del doble de la dureza que presentaba al principio, desde los **44 a los 90 HV0.3**. En caso de querer acelerar el proceso de maduración, simplemente sería necesario envejecerlo artificialmente, siempre y cuando se quieran asumir los costes que ello conlleva.

En cambio, la AA7075 presenta mayores valores de dureza que la anterior aleación (Gráfica 8.14). El endurecimiento en este caso también se da inmediatamente después del temple, pero el aumento de dureza es desmesurado en muy poco tiempo. En apenas **10 minutos** el material ha aumentado su dureza en una magnitud de **20 HV0.3**, por lo que sería conveniente realizar el conformado en *W-temper* antes de este tiempo. De modo que este material, a diferencia del otro, no se podría almacenar después de su temple, y el proceso de fabricación no sería tan flexible. Aun así, esta desventaja es asumible gracias a las altas durezas y resistencias que alcanza este material. Además, se puede observar como en **50 minutos**, la dureza se estabiliza en unos **125 HV0.3**, por lo que, si quisiéramos una pieza final con estas propiedades, bastaría con esperar una hora sin necesidad de tratar el material térmicamente, ahorrando así tiempo y dinero. En este caso, no se ha realizado ningún análisis de aumento de dureza naturalmente a largo plazo, ya que la dureza del envejecimiento natural se ha estabilizado.

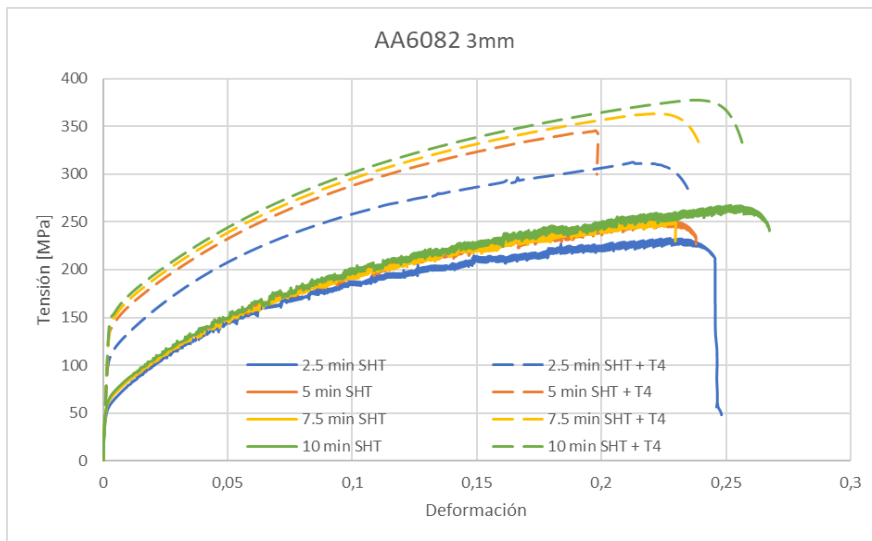


**Gráfica 8.14:** *Aumento de la dureza durante 1 h en el estado W-temper por envejecimiento natural en la AA7075.*

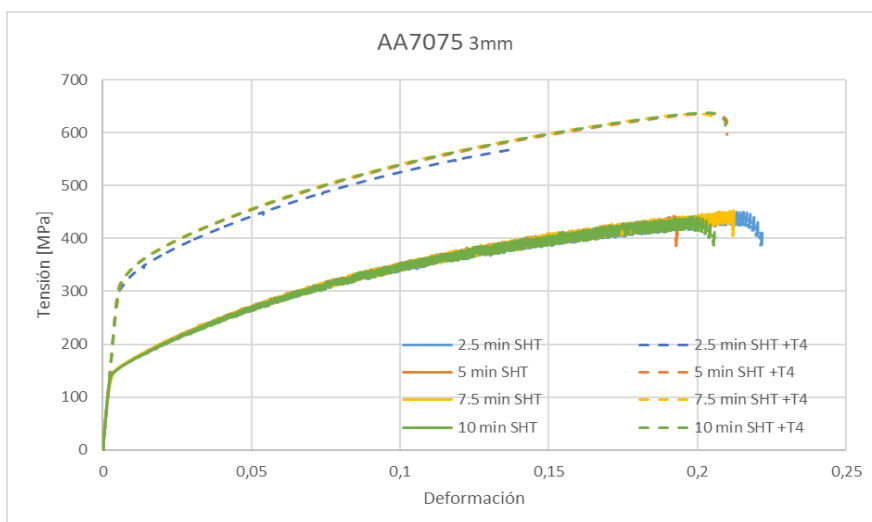
Este aumento de la dureza, tiene a su vez una influencia en el aumento de la resistencia de los materiales. Pero para que el aumento de dureza sea óptimo, la pieza debe estar bien tratada y solubilizada en el estado *W-temper*. Por lo que se han mecanizado varias probetas de



tracción de ambas familias de aleaciones y si les ha tenido bajo un SHT durante sus respectivos tiempos seguido de un temple. Algunas probetas han sido ensayadas inmediatamente después del temple, y a otras en cambio, se les ha aplicado un envejecimiento natural o T4 en base a los anteriores resultados. Las AA6082 han sido endurecidas naturalmente durante **dos semanas** y las AA7075 en cambio, durante **dos horas**. Este aumento de dureza da como resultado un aumento en la resistencia del material como se observa en las siguientes Gráficas (Gráfica 8.15 y 8.16).



**Gráfica 8.15:** Efecto de los con distintos tiempos de SHT, con y sin T4, en la resistencia de las AA6082.

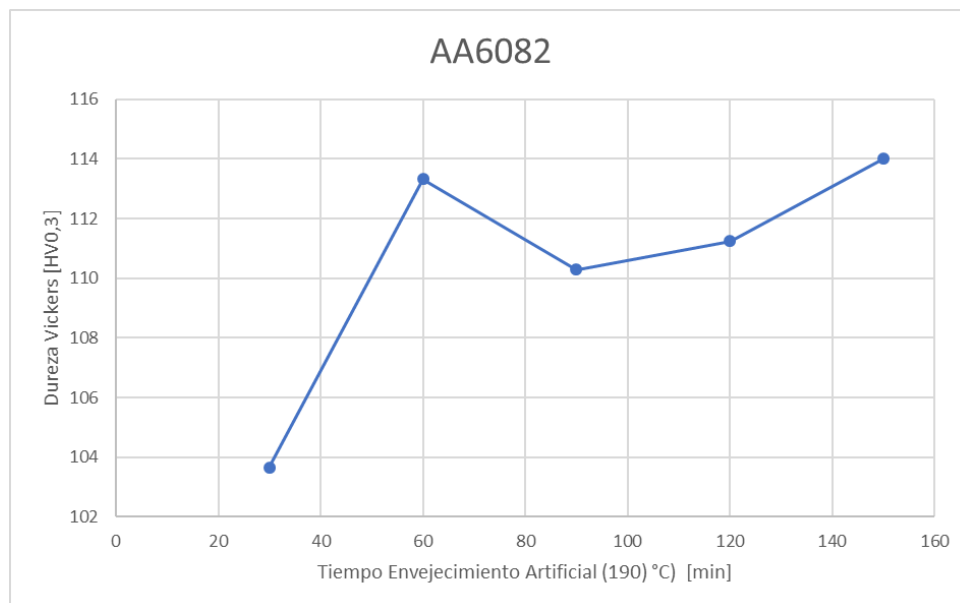


**Gráfica 8.16:** Efecto de los con distintos tiempos de SHT, con y sin T4, en la resistencia de las AA7075.

De estas imágenes se pueden sacar dos resultados principalmente. El primer resultado es que efectivamente, las probetas tratadas con un T4 aumentan su resistencia en magnitudes bastante grandes en ambas AA. El segundo resultado, es que por mucho que se les aplique un tratamiento T4 óptimo, sino no están bien solubilizados y en estado W-temper antes del envejecimiento, sus propiedades finales no son las deseadas. Este fenómeno es más notable en las AA6082 que en las AA7075. Vemos como el SHT de tan solo 2,5 minutos seguido de un tratamiento T4 no aumenta tanto las propiedades como si se les aplica un SHT de 10 minutos. En este caso, las AA6082 T4 alcanzan una **UTS de 380 MPa** con un **SHT de 10 minutos**, mientras que las AA7075 T4 alcanzan un valor de **640 MPa** con un **SHT de 5 minutos**. Por lo que, queda justificado la realización de un correcto SHT para a continuación, favorecer un máximo aumento de la resistencia durante los tratamientos de envejecimiento.

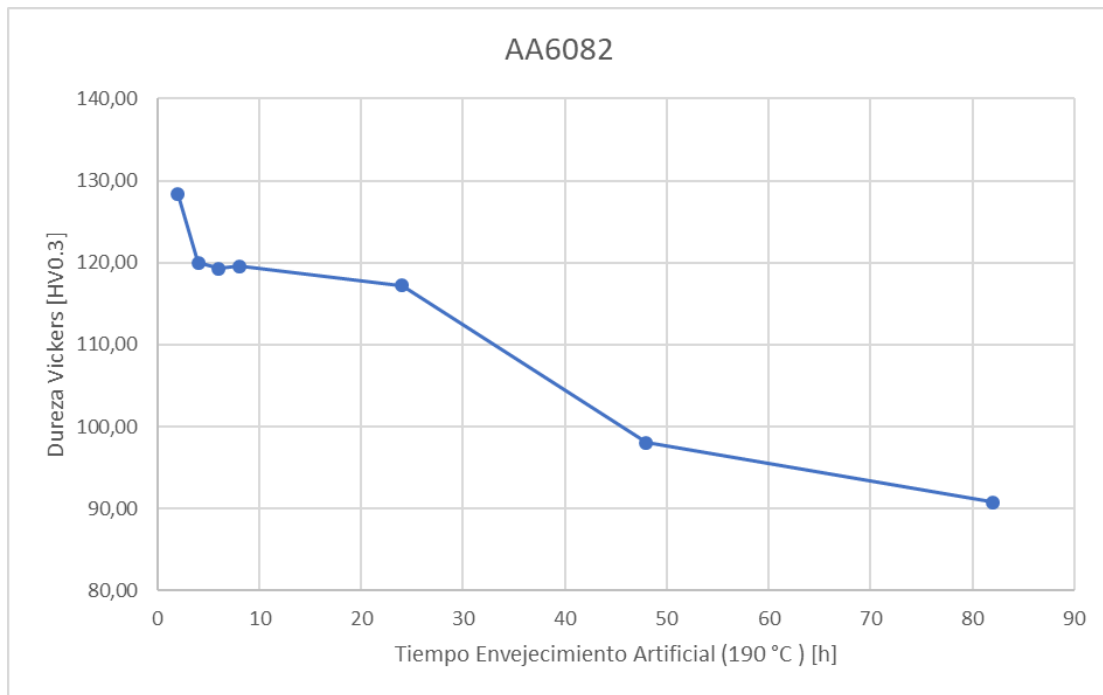
#### 8.2.2.2.2. Envejecimiento Artificial

Cuando el envejecimiento natural no sea viable o no alcance las durezas y resistencias necesarias, se aplicará un envejecimiento artificial, aunque esto conlleve un coste mayor. Por tanto, con el fin optimizar el tratamiento, se definirán los tiempos en horno para envejecer artificialmente ambas aleaciones a la temperatura obtenida en la bibliografía y descrita en el estado del arte. En el caso de las AA6082, esta dureza por envejecimiento artificial se da con bastante rapidez, **de una hora en adelante a una temperatura de 190 °C**, la aleación duplica su dureza hasta los **114 HV0.3** desde el estado *W-temper* (Gráficas 8.17). Pero parece que esta dureza no aumenta mucho más a partir de estas cifras.



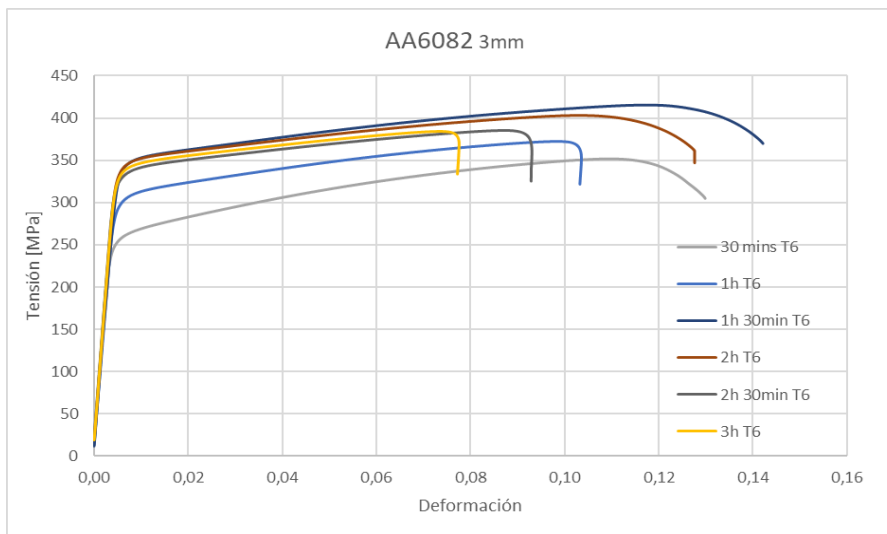
**Gráfica 8.17:** *Aumento de la dureza durante 1h y 30 minutos por envejecimiento artificial a 190 °C en la AA6082.*

Gracias a que el envejecimiento artificial es un proceso más rápido que el natural, se ha decidido observar el sobre-envejecimiento en esta aleación. En la gráfica 8.18 se observa como a partir de las 2h de tratamiento artificial la aleación comienza a perder su dureza desde los **128 HV0.3** hasta los **90 HV0.3**, debido al aumento desmesurado y descontrolado de los precipitados, llegando incluso casi a las durezas iniciales a las 80 horas de tratamiento.



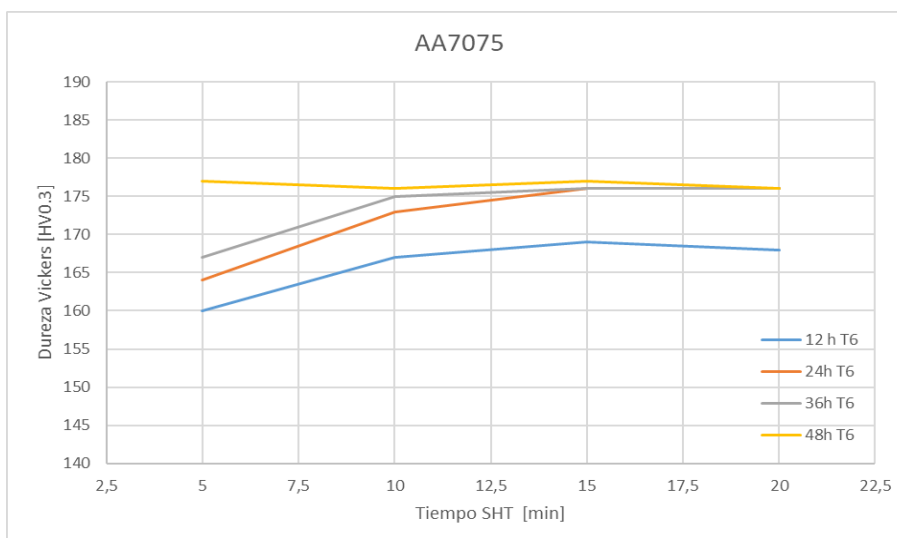
**Gráfica 8.18:** *Disminución de la dureza durante 80 h por sobre-envejecimiento artificial a 190 °C en la AA6082.*

De la misma manera que en el envejecimiento natural, se ha comprobado si este aumento de la dureza acarrea a su vez un aumento de la resistencia (Gráfica 8.19). Para ello se les ha aplicado el SHT óptimo de **10 minutos a 550 °C** calculado en los anteriores apartados unas probetas de AA6082 T4, seguido de un temple en agua. A continuación, estas probetas han sido introducidas en un horno a **190 °C** durante distintos tiempos como en el caso anterior, pero una vez tratadas se las ha ensayado a tracción. Los resultados muestran como con bajos tiempos de tratamiento de envejecimiento y a tiempos demasiado prolongados las probetas no presentan unas características muy resistentes debido al sobre envejecimiento. En consecuencia, la resistencia máxima se obtiene con un tiempo de envejecimiento **de una hora y media**, alcanzado una **UTS de más de 420 MPa**.



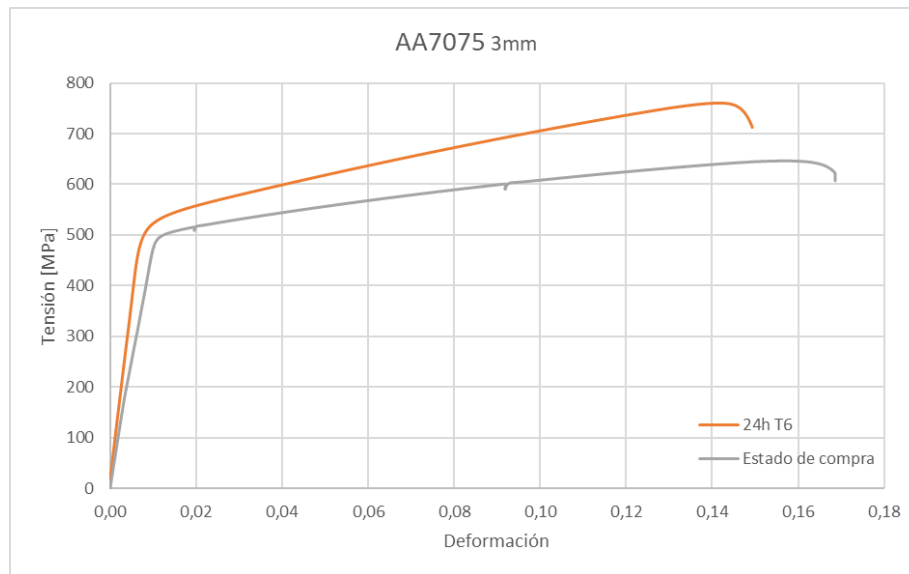
**Gráfica 8.19:** Efecto de los distintos tiempos de envejecimiento artificial a 190 °C en la resistencia de las AA6082.

Bibliográficamente, se sabe que las AA7075 requieren de mayores tiempos de envejecimiento para alcanzar altos valores de dureza y resistencia, por lo que el método seguido ha sido distinto para estas aleaciones. Se ha comenzado por preparar distintas muestras y analizar su dureza durante el tratamiento de envejecimiento a **120 °C** además de tener en cuenta la influencia de SHT para el resultado final. En la gráfica 8.20 se muestra como aumenta la dureza a medida que el tratamiento de SHT y el de envejecimiento son más largos. El tratamiento de precipitación de **24 h** parece ser el más óptimo, ya que, aunque no alcance valores tan altos como el resto, la diferencia no es muy grande, y esto con tiempos de **SHT de 10 minutos**.



**Gráfica 8.20:** Efecto de los distintos tiempos de SHT a 480 °C y envejecimiento artificial a 120 °C en la dureza de las AA7075.

Para corroborar estos valores se ha ensayado una probeta de tracción con unos parámetros óptimos de un **SHT de 10 minutos a 480 °C**, con un temple en agua seguido de un envejecimiento artificial de **24h a 120 °C**. Los resultados muestran un aumento de la resistencia máxima respecto al estado de compra inicial en un T6 (Gráfica 8.21). A pesar de que la ductilidad queda algo reducida, este nuevo tratamiento eleva el valor de la **UTS de las AA7075 a más de 750 MPa**. Un valor muy competente comparado con los actuales aceros de la industria automovilística, pero con un peso tres veces menor.



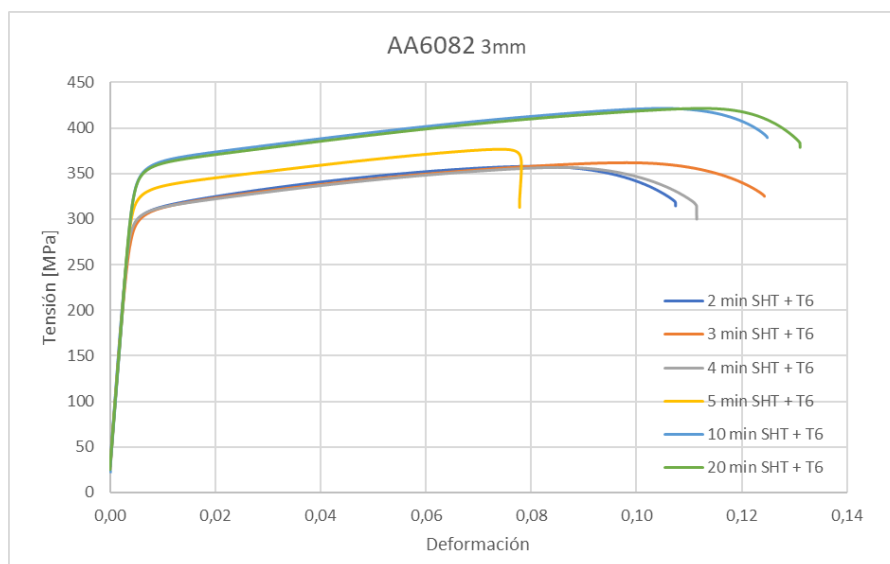
**Gráfica 8.21:** *Mejora de la resistencia de las AA7075 respecto al estado de compra gracias a la optimización de los parámetros de los TT.*

### 8.2.2.3. Propiedades finales

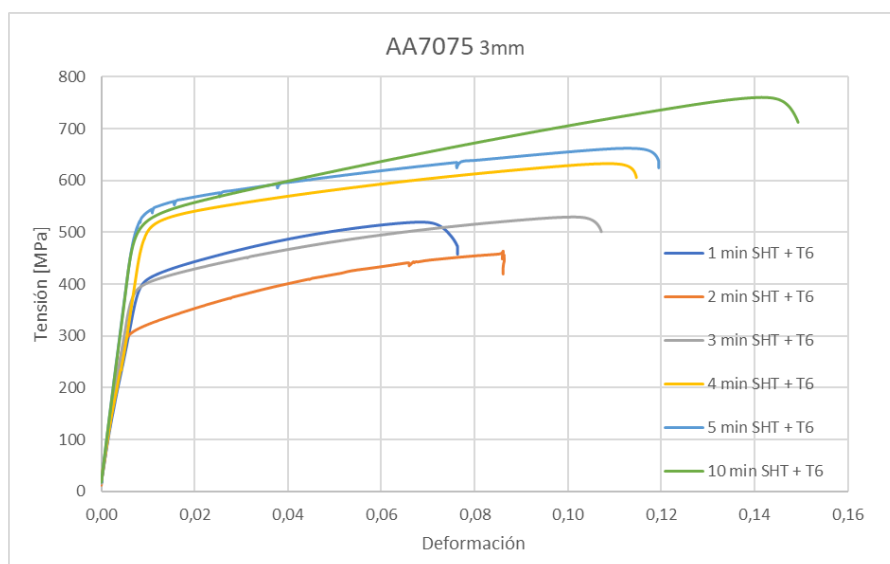
A continuación, se analizarán varios parámetros para ver la influencia que estos tienen sobre las propiedades mecánicas finales de las piezas. Para ello, se terminará con la optimización de los tratamientos térmicos en horno como tal. También se analizará el resultado de combinar tratamientos T4 y T6, y la influencia que estos tienen en las propiedades finales. Así pues, se podrá saber si es posible almacenar el material en estado *W-temper* y aplicar después el tratamiento T6 sin una pérdida excesiva de propiedades.

En los anteriores apartados se ha establecido el tiempo óptimo del SHT para ambos materiales. Con la ayuda de estos valores, se han obtenido los tiempos óptimos de envejecimiento natural y artificial. Ahora solo queda terminar el proceso iterativo, verificando si esos valores óptimos de envejecimiento han alterado el tiempo óptimo de SHT atendiendo a sus propiedades finales. Por lo que ambos materiales han sido ensayados a tracción con tiempos de SHT distintos, seguido de un temple en agua y un tratamiento T6 óptimo, **1h y 30**

minutos a 190 °C para los AA6082 y 24h a 120 °C para las AA7075. En la siguiente gráfica (Gráfica 8.22) se puede observar como a partir de un tiempo de SHT de 10 minutos la AA6082 no mejora su resistencia, por lo que se deduce que este tiempo es el ideal para disolver completamente los precipitados y obtener así una UTS de 420 Mpa. Lo mismo se puede observar para la AA7075 (Gráfica 8.23), que alcanza su resistencia máxima, UTS de 750 Mpa, con el mismo tiempo de SHT.

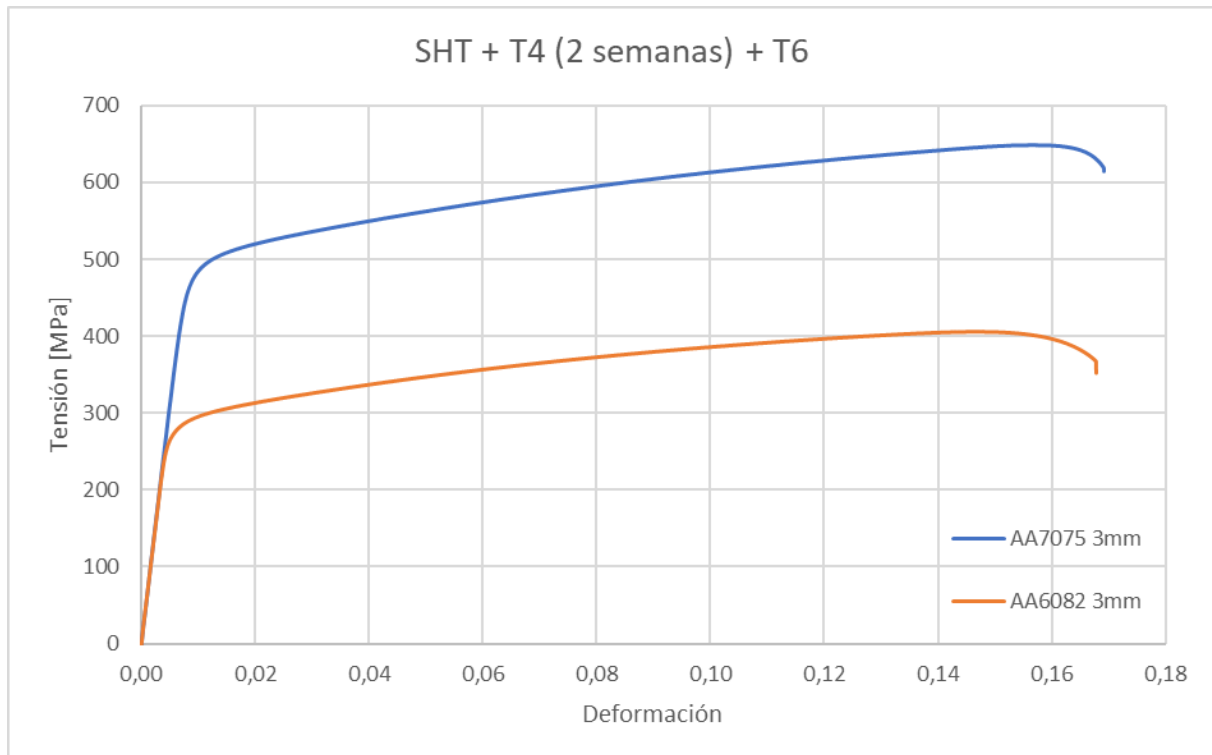


Gráfica 8.22: Efecto de los distintos tiempos de SHT a 550 °C en la resistencia de las AA6082 T6.



Gráfica 8.23: Efecto de los distintos tiempos de SHT a 480 °C en la resistencia de las AA7075 T6.

Con la idea de mejorar aún más los TT y otorgar mayor flexibilidad al proceso, se ha decidido analizar el efecto de mantener el material almacenado en estado *W-temper* a la espera de su tratamiento T6. Para ello, después de su tratamiento de SHT óptimo correspondiente, se ha decidido llevar los valores al extremo y simular un tiempo de almacenaje de **2 semanas** para ambos materiales, seguido de su correspondiente tratamiento de endurecimiento T6.



**Gráfica 8.24:** *Efecto combinado del almacenaje en estado *W-temper* y envejecimiento artificial en la resistencia de las AA6082 y AA7075.*

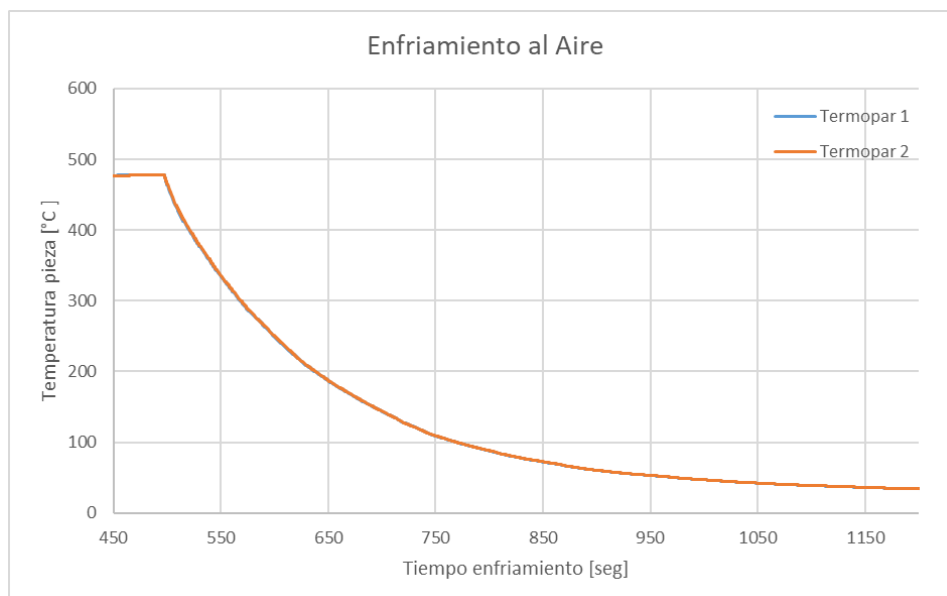
Los resultados muestran cómo la resistencia máxima de ambos materiales sigue siendo bastante alta, de **400 MPa** para la AA6082 y **650 MPa** para la AA7075 (Gráfica 8.24). Aun así, sus valores máximos han decrecido debido a un pequeño “sobre-envejecimiento” ocasionado por el exceso tiempo de almacenaje. Siempre y cuando el cliente pueda asumir esta pérdida de resistencia, puede ser un factor a tener en cuenta, ya que las piezas podrían ser almacenadas hasta llegada la hora de conferirles sus propiedades mecánicas finales, o por ejemplo, para realizar otra clase de operaciones en el material y aprovechar su baja dureza en este estado y disponer de mayor flexibilidad durante el proceso completo pudiendo reservar las piezas para más adelante.

#### 8.2.2.4. Temple

Para terminar con el ajuste de los parámetros durante los TT queda analizar la influencia de los distintos medios de temple. Hasta ahora, la obtención de los parámetros óptimos de los tratamientos de solución y precipitación, se han realizado con un temple en agua que garantiza el estado *W-temper*. Pero puede que existan otros medios, como el aire o el contacto directo con otro sólido bajo presión, que pueden resultar útil para un proceso industrial específico. Para ello, se han mecanizado probetas de tracción de AA7075 más pequeñas (para facilitar su manejo), pero igualmente normalizadas de 100 mm de longitud y se les ha introducido dos termopares a través de unos orificios en su espesor que llegan al centro de la pieza. Estas probetas han sido puestas en solución dentro del horno hasta que han alcanzado su temperatura óptima anteriormente establecida y se han dejado enfriar en distintos medios. Para estos ensayos, Únicamente se ha empleado la AA7075 ya que ambas presentan conductividades y difusividades térmicas parecidas (Ver en tabla 5.2)

##### 8.2.2.4.1. Temple en Aire

El enfriamiento en aire es un parámetro muy importante, no con el fin de templear el material en sí (ya que las aleaciones con las que se trabaja en este proyecto no son autotemplables), sino para determinar la velocidad de enfriamiento que sufren estas piezas al aire. Así, se podría saber el efecto que pueden tener los distintos tiempos de transferencia desde el horno hasta el medio de temple en las propiedades finales, y si estos tiempos de transferencia garantizan un temple completo.



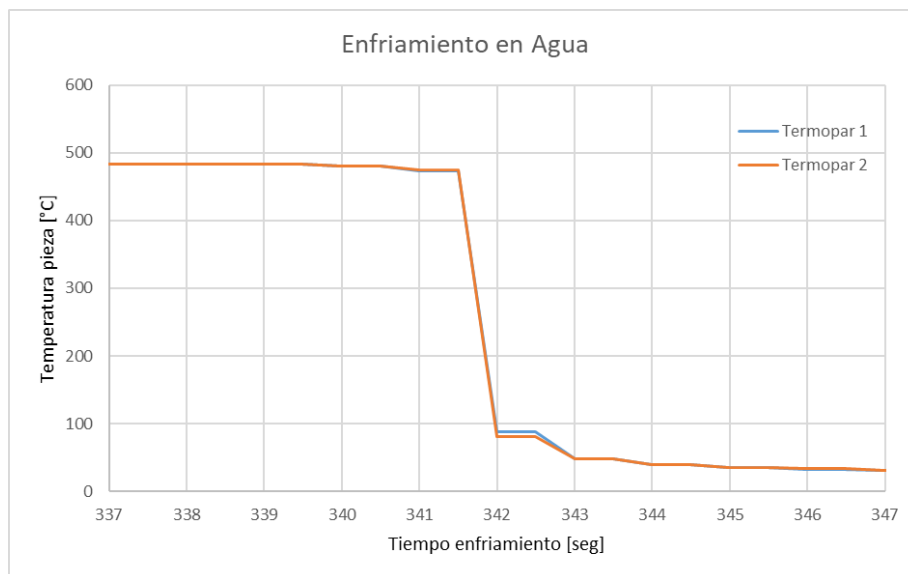
**Gráfica 8.25:** Perfil de enfriamiento en aire de las AA.



Como se observa en la anterior gráfica (Gráfica 8.25), la pieza comienza a enfriarse gradualmente a una velocidad muy lenta una vez ha sido extraída del horno. Esta pieza en concreto tarda unos **12 minutos** en enfriarse completamente hasta la temperatura ambiente, es decir, que la velocidad media de enfriamiento en aire es inferior a **-1 °C/seg**. Por supuesto, esta velocidad de enfriamiento no es suficientemente rápida para garantizar un temple completo, pero si puede otorgar información valiosa durante el proceso de transporte de la pieza en caliente.

#### 8.2.2.4.2. Temple en Agua

El enfriamiento en agua, en cambio, es el temple por excelencia. El agua tiene la capacidad de disipar una gran cantidad de calor en poco tiempo. Por lo que se ha decidido estudiar su velocidad de enfriamiento en estas probetas. Se puede observar en la imagen una pequeña pendiente inicial que representa el enfriamiento que sufre la pieza desde su transporte del horno, hasta el baño de agua (Gráfica 8.26). De modo que estudiar esta parte del proceso es también importante como ya se ha visto.



**Gráfica 8.26:** Perfil de enfriamiento en agua de las AA.

A continuación, una vez la pieza ha sido sumergida en agua, la temperatura de la pieza cae drásticamente desde la temperatura SHT hasta la temperatura del agua en apenas **1 segundo**. Este rápido enfriamiento es incluso demasiado rápido para la tarjeta que capta la señal del termopar, por lo que se necesitaría de una tarjeta de obtención de datos que trabaje a mayores frecuencias para ver el verdadero perfil de enfriamiento que sufre la pieza. Aunque

en este caso, para determinar una velocidad de enfriamiento aproximada será suficiente. La velocidad de enfriamiento en este caso supera los **-750 °C/seg**, lo que garantiza un temple completo si la comparamos con la velocidad crítica de enfriamiento de **-60 °C/seg** establecida en la curva “C” del estado del arte (Grafica 5.1). Este valor, aunque corresponda a una AA6060, de momento se hará la suposición de que es parecido en las AA7075 y AA6082.

#### 8.2.2.4.3.    Temple en Prensa para *Hot Stamping*

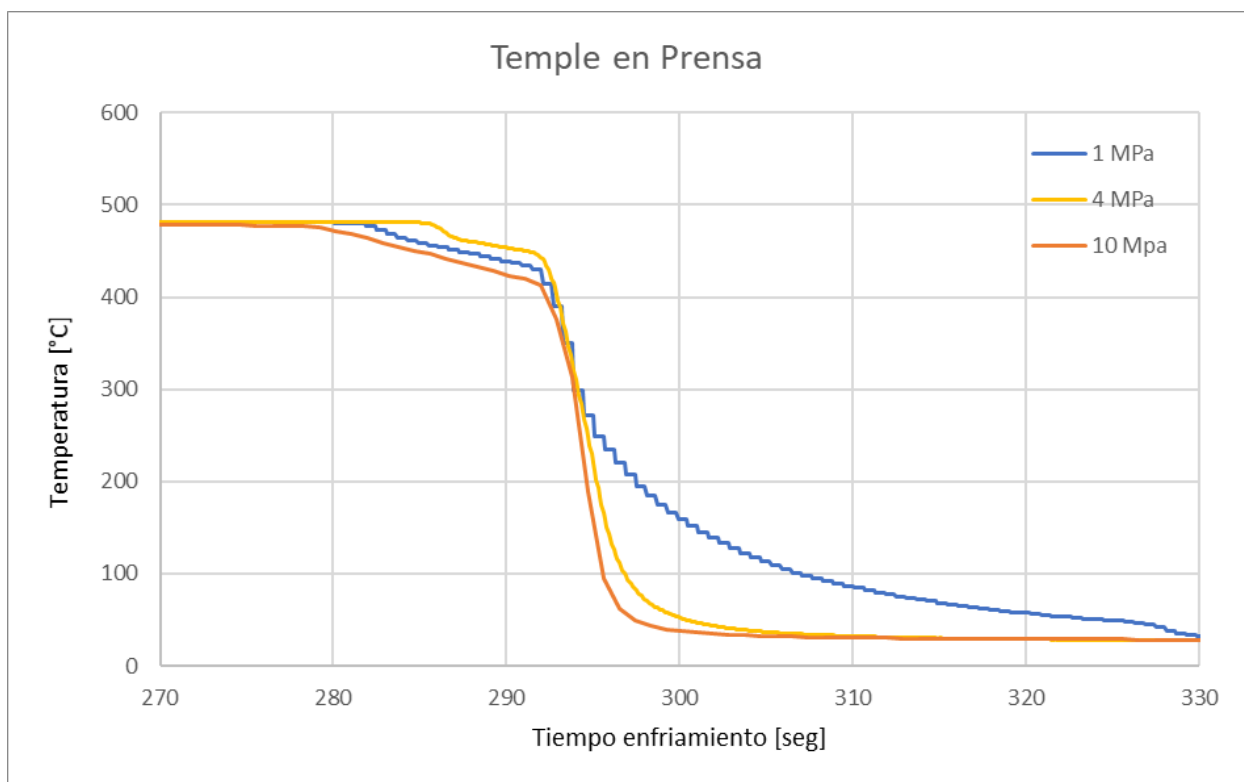
La razón por la que se analiza el temple en prensa es porque en los procesos de *Hot Stamping* tradicionales la pieza se temple en la prensa al mismo tiempo que se conforma, como ya se ha mencionado en el estado del arte. Por lo que es de suma importancia estudiar este fenómeno, para garantizar el temple adecuado dentro de la prensa. Sin duda, la temperatura del troquel tiene una gran influencia sobre este proceso. Las prensas que trabajan en líneas de producción están equipadas con troqueles refrigerados, ya que el elevado número de piezas por minuto que procesan hacen que estos se calienten en exceso. Además, la presión que ejerza el troquel influye considerablemente en la velocidad de enfriamiento de la pieza.

Se han seleccionado probetas de ensayos de tracción de pequeño tamaño, como bien se ha mencionado antes, con un área de contacto de varias magnitudes inferior a la del troquel de la prensa para que el troquel en el que se hace el temple no se caliente demasiado, y así, poder simular el mismo enfriamiento del proceso industrial sin necesidad de refrigerar el troquel. Analizando los procesos de *Hot Stamping* tradicionales, se ha concluido que las presiones estándar que ejercen estas prensas sobre piezas estructurales para vehículos se encuentran entre los 1 y los 10 MPa. Por lo que, los ensayos han sido realizados con dichas presiones y otra presión intermedia de 4 MPa.

Siguiendo el mismo procedimiento de calentamiento y medición que en los anteriores medios de temple, se puede observar en la siguiente imagen el rápido temple que se obtiene con el enfriamiento por contacto bajo presión (Grafica 8.27). La primera rampa de enfriamiento más lento representa el cambio de temperatura que sufre la pieza desde que se extrae del horno hasta que entra en contacto con el troquel cuando este se cierra. Durante este proceso de transferencia, la pieza pierde gran parte de su temperatura, por eso era importante establecer la velocidad de enfriamiento en aire. Una vez el troquel hace contacto con la pieza y alcanza la presión establecida, la pendiente de enfriamiento es mucho mayor. A pesar de no ser un enfriamiento tan brusco como en el agua, se trata de un enfriamiento capaz de templar adecuadamente una pieza estructural.

Se puede apreciar cómo cuanto mayor sea la presión ejercida, mayor es la velocidad de enfriamiento. Ejerciendo una presión de **10MPa** se consigue enfriar la pieza desde la

temperatura de SHT hasta la temperatura ambiente en **menos de 5 segundos** con una velocidad media de enfriamiento de **-80°C/seg**. De este modo, la pieza quedaría completamente templada según la velocidad crítica de enfriamiento antes establecida, mientras que con una presión de 1 MPA este proceso lleva **más de 35 segundos** y con una velocidad media de enfriamiento de poco más de **-10°C/seg**, por lo que no se templaría adecuadamente. Esto es debido básicamente al contacto superficial entre la pieza y el troquel: cuanto mayor sea la superficie de contacto entre ambas, mayor será el flujo de calor y por tanto mayor disipación de este. Esta superficie de contacto aumenta junto con la presión, ya que la rugosidad de ambos materiales es aplanada por un “aplastamiento”, y como consecuencia se aumenta el contacto.

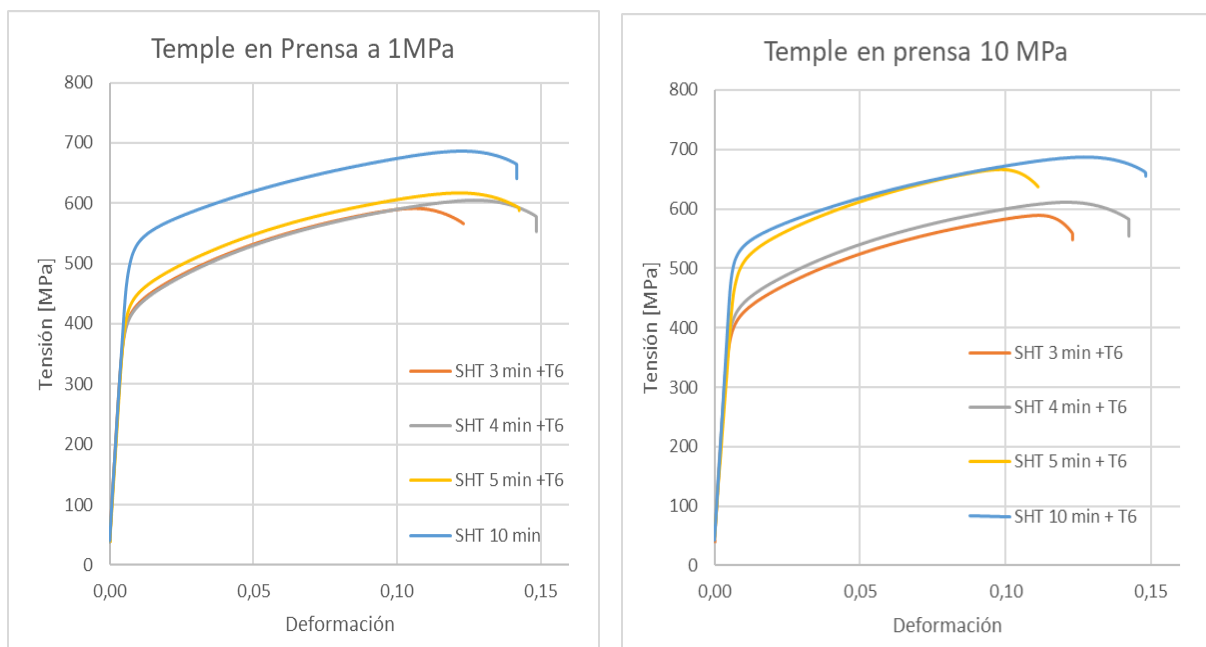


**Gráfica 8.27:** Perfil de enfriamiento en prensa de las AA a distintas presiones (1, 4 y 10 MPa).

Queda claro, por consiguiente, que el temple completo en aire es imposible para estas aleaciones, y el temple en agua excesivamente capaz. Pero las velocidades intermedias que presentan los temples en prensa quedan en duda, ya que están muy cerca del límite de la velocidad crítica de enfriamiento. Por lo que se han llevado a cabo los últimos ensayos de este apartado para optimizar estos procesos térmicos de enfriamiento. Para ello se han tomado distintas probetas de tracción de ambas aleaciones, AA7075 y AA6082, con las mismas medidas que las anteriores y se las han aplicado distintos tiempos de SHT seguido de una serie

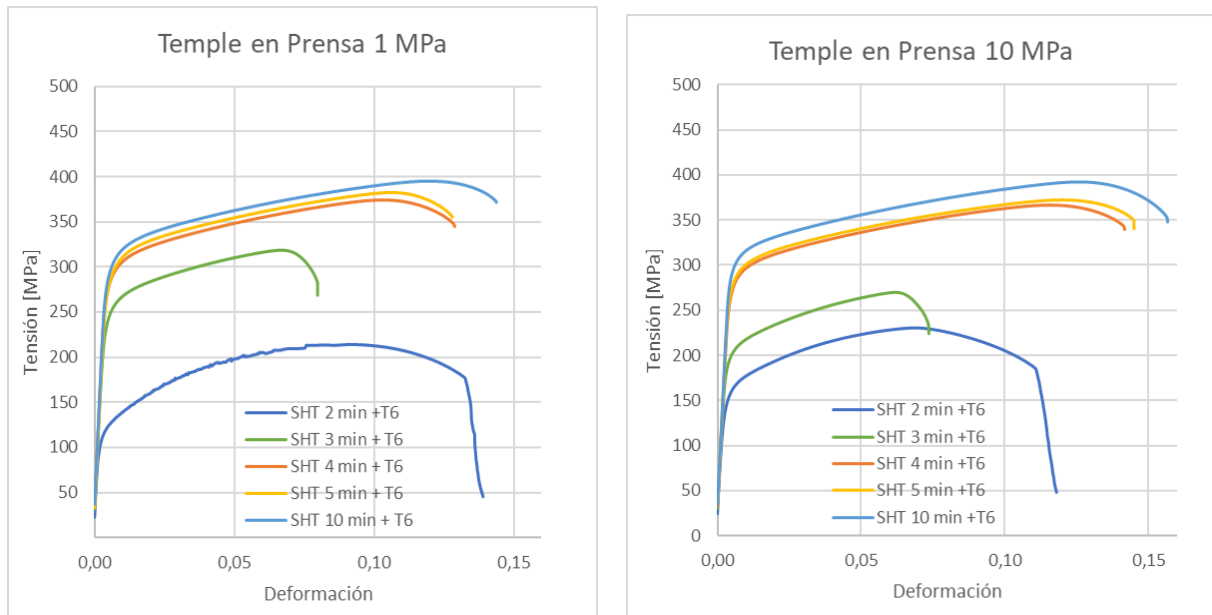
de temple en prensa a distintas presiones. Por último, estas probetas han sido tratadas térmicamente con un T6 óptimo y ensayadas en la máquina de tracción para comprobar la influencia del SHT y al mismo tiempo el efecto de este temple en las propiedades finales de la pieza.

En las AA7075 apenas se observan diferencias entre los temple con las distintas presiones (Gráficas 8.28 y 8.29). Como se ha visto anteriormente y se vuelve a repetir, sí que es notable la diferencia de los distintos tiempos de SHT. En el caso del tiempo de SHT de 5 minutos, sí se aprecia una gran diferencia a distintas presiones, por lo que se podría deducir, que la influencia en este rango de presiones no es muy notable, salvo en tiempos de SHT bajos, a los que el aumento de presión y por tanto el aumento de la velocidad de enfriamiento les favorece sutilmente.



**Gráfica 8.28 (Izq) y Gráfica 8.29 (Der): Efecto de los distintos tiempos de SHT e influencia del temple en prensa a distintas presiones de las AA7075.**

En las AA6082 en cambio, esta variación de presiones si les influye sutilmente incluso a tiempos de SHT más altos (Gráficas 8.30 y 8.31).. Por lo que añadiendo una mayor presión al troquel se conseguiría aumentar la resistencia máxima sutilmente en un proceso industrial, siempre y cuando este pequeño aumento merezca la pena. Por otro lado, una vez más, se puede observar como el tiempo de SHT influye en las propiedades finales de la pieza, y que el SHT de 10 minutos es el óptimo en este caso también.



**Gráfica 8.30 (Izq) y Gráfica 8.31 (Der):** Efecto de los distintos tiempos de SHT e influencia del temple en prensa a distintas presiones de las AA6082.

### 8.3. Proceso de conformado en estado *W-temper*

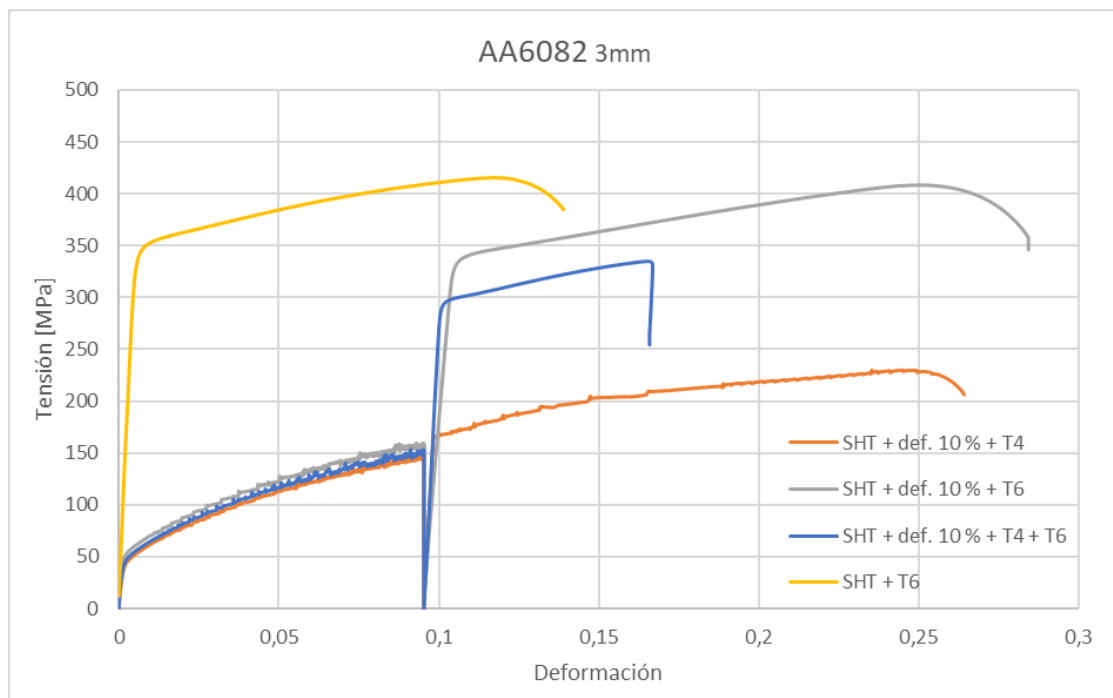
Es bien sabido que el conformado en estado *W-temper* posiblemente se trate de la variante de la estampación en caliente más innovadora hasta ahora vista. Por lo que después de optimizar y definir los parámetros de los TT, solo queda ver la influencia de este conformado en las propiedades finales de la pieza. Para ello se estudiará la influencia de la deformación que sufren estas piezas y si dicha deformación en estado *W-temper* afecta a los precipitados, y también estudiar la influencia de la velocidad de deformación y así poder especificar cuál es la velocidad de conformado óptima.

#### 8.3.1. Influencia de la deformación

Las AAAR son conformadas en el estado *W-temper* debido a su baja ductilidad en este estado, de modo que este estado facilita el conformado de dichas piezas, lo que supone una gran ventaja no solo porque se necesite menor fuerza en la prensa, sino porque se evita manipular la chapa en caliente y se ahorra energía. De tal forma que para definir si este conformado supone una ventaja o no, se debe estudiar la influencia de la deformación sobre las propiedades finales, ya que si dicha deformación en *W-temper* dificulta la aparición de precipitados en la maduración, el conformado en estado *W-temper* sería totalmente inútil.

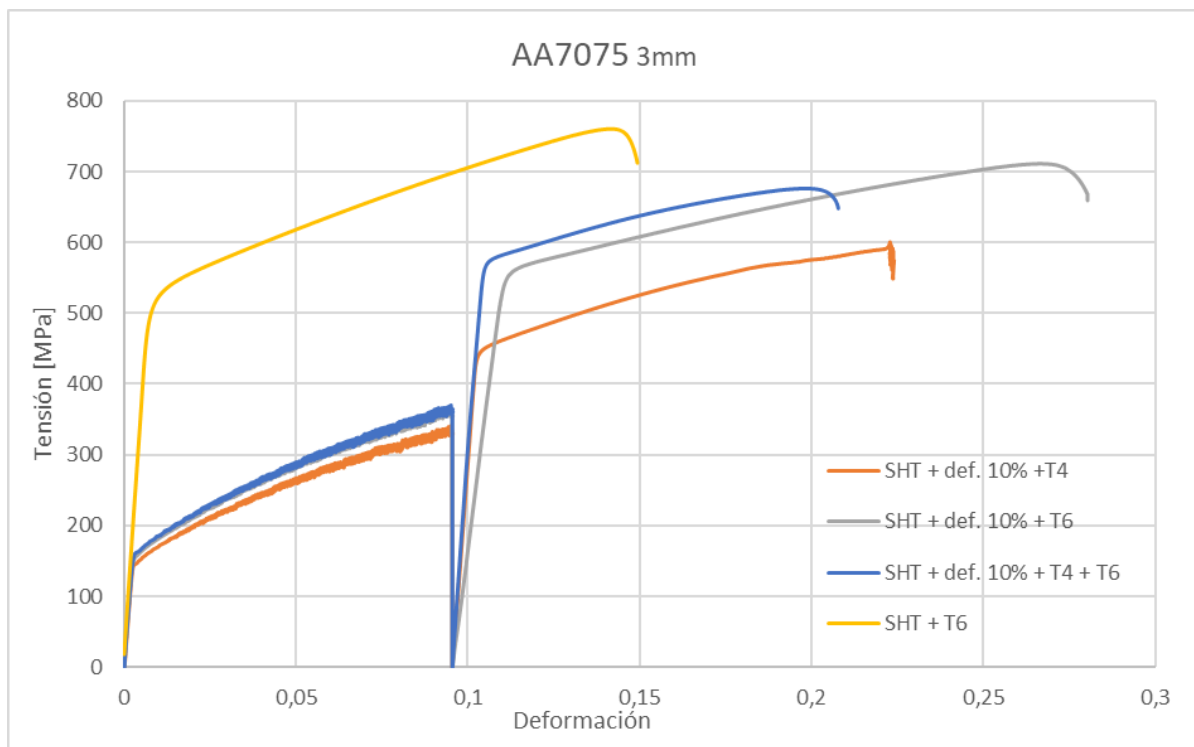
Para ello se han mecanizado de nuevo probetas grandes normalizadas de 200 mm, ya que en este caso no es necesario templarlas en prensa y que tengan un pequeño tamaño. A dichas probetas se les aplicará un SHT óptimo y completo, seguido de un rápido temple en agua para favorecer el adecuado estado *W-temper* a temperatura ambiente. A continuación, sin apenas perder tiempo, la probeta es estirada en la máquina de tracción un 10 % para simular la deformación sufrida en el troquel de una prensa durante su conformado. El valor de 10 % se ha establecido debido a que es habitual que las piezas estructurales de vehículos sufran este valor de deformación en sus partes más estiradas durante el conformado, por lo que este valor de 10 % es bastante conservador. Una vez la probeta haya sido estirada un 10 %, se les ha aplicado distintos tratamientos como el T4, T6 y T4 +T6 para ver la influencia de esta deformación en las propiedades finales. La resistencia máxima obtenida con la deformación y el tratamiento T6 será, además, comparada con el T6 sin deformar.

Y como se puede apreciar en las siguientes graficas (Gráficas 8.32 y 8.33), las probetas de ambas AA han sido deformadas hasta un 10 %, y después del tratamiento, se han ensayado hasta su rotura. Con el efecto combinado de los tratamientos T4 + T6 tampoco se alcanzan los valores del envejecimiento artificial corriente, del mismo modo que en las probetas sin deformar, aunque si son bastante altos. Además, en el caso de los tratamientos T4 y T6, tampoco parece que la deformación inicial de 10 % cause variaciones muy grandes en los valores de resistencia respecto a las probetas sin deformar. De modo que la deformación en estado *W-temper* no altera en exceso las propiedades de resistencia de las AAAR.



**Gráfica 8.32:** Efecto del conformado en estado *W-temper* de las AA6082.

Aun así, sí se aprecia como la deformación total en las AA6082 y las AA7075 varía después de la deformación inicial del 10%. Parece ser que los tratamientos finales tienen la capacidad de hacer que las piezas vuelvan a recuperar la capacidad de deformación inicial, incluso un poco más. Por lo que después del conformado, además de mantener prácticamente las mismas resistencias máximas, el material presenta una capacidad de deformación superior a la del principio.



**Gráfica 8.33:** Efecto del conformado en estado *W-temper* de las AA7075.

Por ejemplo, las probetas de AA6082, con el extensómetro situado con una separación de 50 mm, alcanzaban deformaciones de hasta un 14 % en su estado T6 óptimo. Las probetas en estado *W-temper* son deformadas un 10 %, por lo que aumentan su longitud hasta los 55 mm. Después de dicha deformación y el correspondiente tratamiento T6, su deformación máxima hasta la rotura alcanza valores del 27 % respecto a la longitud inicial de 50 mm, por lo que la longitud final de la probeta sería de 63,5 mm. Si tenemos en cuenta el estado de después del conformado (55 mm) como la longitud inicial, implicaría que la probeta alcanza una deformación real del 15,45 %. Lo que supone un incremento en la deformación máxima del 1,45 % gracias al conformado en estado *W-temper*, lo que compensa el pequeño descenso en la UTS. Se podría decir entonces, que el proceso de conformado en estado *W-temper* no altera las propiedades finales de la pieza, en todo caso, las mejora levemente, así como su tenacidad. Este mismo cálculo es a su vez aplicable a las AA7075.

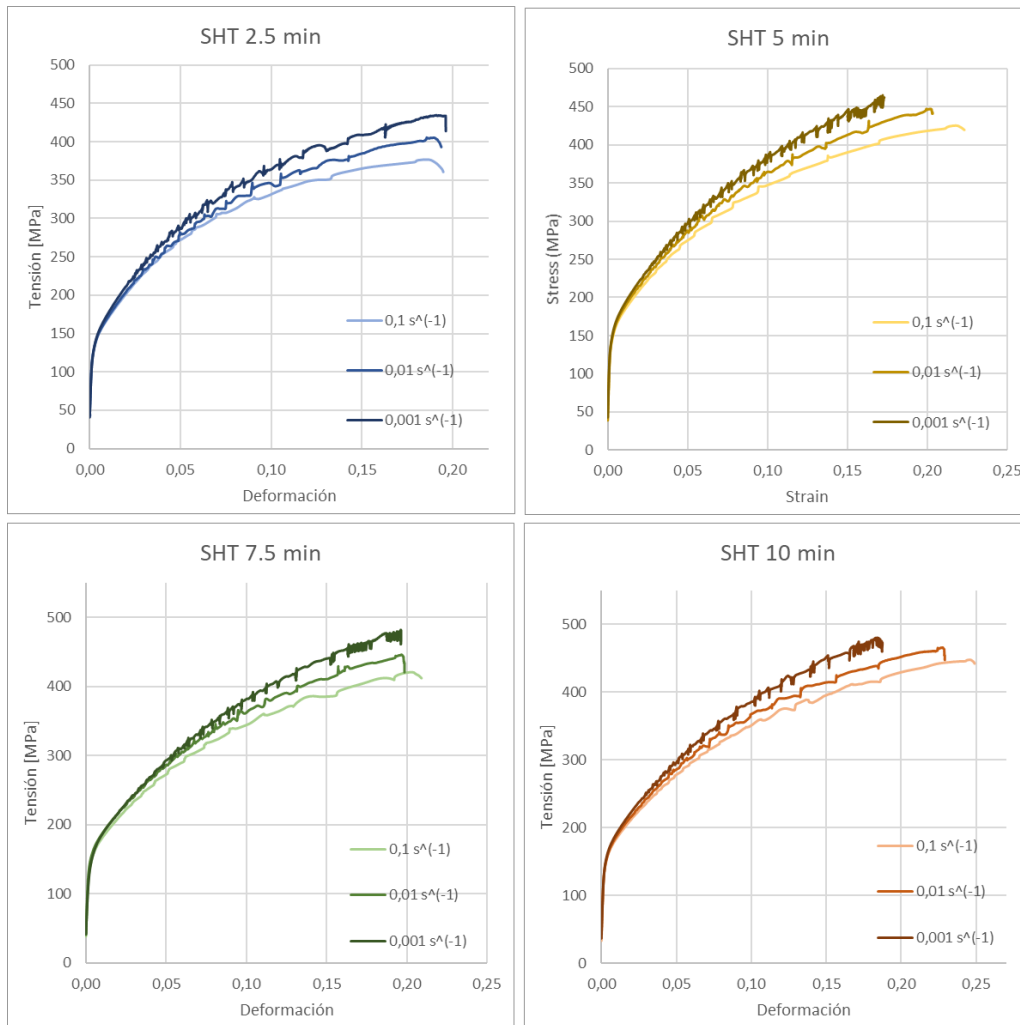
### 8.3.2. Influencia de la Velocidad de deformación

En este último apartado de la Metodología y Resultados, se mostrarán los resultados obtenidos de deformar las AA7075 a distintas velocidades en el estado *W-temper*, y la influencia que estos tienen sobre las propiedades finales. Como se sabe, en cualquier aleación metálica común, el material se comporta de distinta forma cuando es deformado a velocidades distintas. Normalmente, cuando se deforma una AA a alta velocidad, esta opone mayor resistencia y presenta menor capacidad de deformación que si es deformada a velocidades lentas. Esto es a causa de las propiedades visco plásticas y sensibilidad a la velocidad de deformación que presentan las aleaciones metálicas.

El comportamiento macroscópico del avance de las dislocaciones y su obstaculización en los precipitados, hace que varíe con la velocidad de deformación, por lo que a mayores velocidades de deformación se obtiene un endurecimiento estructural mayor en la mayoría de las aleaciones metálicas. De modo que, si se quiere aumentar la capacidad de deformación y reducir la resistencia que opone un material a su conformado, se debe de reducir esta velocidad de deformación, lo que hace que se tenga que conformar con velocidades más lentas, como en los casos de las deformaciones de súper-plasticidad. Se podría decir entonces, que estas aleaciones en general presentan una sensibilidad positiva a la velocidad de deformación.

Este fenómeno ha sido estudiado para el caso de las AA en estado *W-temper*. Para ello se han vuelto a tomar distintas probetas de 200 mm de largo, y se les han aplicado distintos tiempos de SHT, seguido de un temple en agua para obtener el estado *W-temper*. A continuación, se han definido tres velocidades de deformación que se usan actualmente en la industria de la embutición para analizar su influencia en este estado de las AA. Por lo que las probetas han sido ensayadas a distintos tiempos de SHT y distintas velocidades de deformación (0.1, 0.01, y  $0.001 \text{ s}^{-1}$ ). Es de vital importancia deformar la probeta a una velocidad de deformación constante, para analizar con exactitud su influencia en la resistencia, ductilidad y SHT de estos materiales. Por lo que se ha establecido una curva de velocidad ascendente en la máquina de tracción que hace que esta velocidad de deformación sea constante, ya que, si la velocidad de la máquina de tracción fuera constante no lo sería así la velocidad de deformación porque la probeta aumenta su longitud a cada momento.





**Gráfica 8.34:** Efecto de distintos tiempos de SHT y la velocidad de deformación en el estado *W-temper* en las AA7075.

En la anterior grafica (Gráfica 8.34) se muestra como varía el comportamiento de la AA7075 según la velocidad de deformación y tiempo de SHT. Tal y como sucedía en los anteriores casos, el tiempo de SHT tiene una gran influencia en el resultado final. Pero si observamos la influencia de la velocidad de deformación, se aprecia cómo cuanto menor sea esta velocidad, mayor resistencia opone a esta deformación y por lo tanto presenta una menor ductilidad. Justo lo contrario a lo que suele suceder con las aleaciones metálicas comunes, como bien se ha detallado antes. Puesto que estas AA comienzan a endurecer con rapidez, es de suma importancia conformarlas lo más rápido posible, para así evitar usar fuerzas de prensa mayores y evitar roturas en la pieza por falta de ductilidad y de conformabilidad.

De modo que queda claro que las AA presentan una cierta sensibilidad en el estado *W-temper*, que además es negativa. A pesar de que no se conozca la razón de este fenómeno atípico,



---

queda claro que es beneficioso para el conformado en estado *W-temper*, ya que, a mayor velocidad de deformación, más dúctil y blanda se vuelve la pieza. Se cree que este fenómeno puede ser debido a la combinación de dos efectos, uno estático y otro dinámico. Durante el ensayo de tracción, la AA7075 comienza a endurecer naturalmente. Esto hace que la pieza tenga más tiempo para endurecer durante los ensayos a baja velocidad, por lo que se trataría en este caso de un efecto estático. La influencia del efecto dinámico puede ser debido a la propia naturaleza de la pieza, que a diferencia del resto de los materiales, presenta una sensibilidad negativa a la velocidad de deformación.

## 9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS Y CRONOGRAMA

### 9.1. Equipo de trabajo e investigación

El equipo de trabajo del proyecto está compuesto por varios integrantes de distintas entidades, como Fagor Arrasate S. Coop. (FA), la Escuela Politécnica Superior de Mondragón (MGEP, Mondragon Goi Eskola Politeknikoa) dentro de la Universidad de Mondragón (MU, Mondragon Unibertsitatea) y la Escuela de Ingeniería de Bilbao (Universidad del País Vasco).

La directora de este proyecto, la **Dra. Ainhoa Lejardi Meavebasterrechea**, pertenece a la Escuela de Ingeniería de Bilbao y trabaja en el departamento de Ingeniería de Materiales, así como la **Dra. Ester Zuza Hernandez**, Co-directora del proyecto, y **Unai Ibarreche Lopez**, alumno que realiza y redacta el Trabajo de Fin de Master. Otros de los integrantes del grupo de investigación son el **Dr. Lander Galdos** y la **Dra. Nagore Otegi**, responsables y supervisores directos de este trabajo pertenecientes al departamento de I + D de procesos avanzados de conformado de materiales en la facultad de ingeniería de la Universidad de Mondragón (MU). Además, se cuenta con la ayuda de **Jon Etxarri Mendizabal** para llevar a cabo este proyecto y realizar los experimentos pertinentes, alumno cursando actualmente el tercer curso en ingeniería mecánica en la MU. El último integrante que componen este grupo es **Unai Argarate Belategi**, responsable de desarrollo de proyectos del centro de investigación *Koniker S. Coop.* que se encuentra dentro *Fagor Arrasate S. Coop.*

### 9.2. Tareas

En este apartado se explicarán todas las tareas que se han llevado a cabo para la correcta realización de este trabajo. Las tareas realizadas durante este proyecto de principio a fin son las siguientes:

#### T1. Definición, control y preparación inicial del proyecto

##### **T1.1 Reuniones con las distintas entidades.**

Con el fin de asegurar una correcta iniciación y seguimiento del trabajo, se han establecido distintas reuniones periódicas a lo largo del desarrollo completo del proyecto. Estas reuniones comienzan con una quedada en conjunto con FA y la MU para establecer lo que se debe llevar a cabo y ajustar una dirección en la investigación, y terminan con una reunión de supervisión y visita a la Empresa *BENTELER Automotive* en Paderborn (Alemania) junto con FA y MU con el fin de establecer relaciones y buscar cooperación para futuras investigaciones en lo

correspondiente a este trabajo, además de presentarles el proyecto a cambio de ser ayudados a establecer un nuevo enfoque y vía de desarrollo cara al futuro. Una reunión a mitad de proyecto con la directora y Co-directora del trabajo ayudan a definir los ensayos a realizar para complementar el trabajo y comenzar a redactar el informe escrito.

### **T1.2 Planificación y estrategia**

El siguiente paso es establecer la estrategia del trabajo y planificar los ensayos y la búsqueda de información. Además, gracias a la planificación ha sido posible determinar e inscribirse con anterioridad a los cursos formativos de la MU y poder realizar una gran cantidad de experimentos y ensayos en un espacio reducido de tiempo.

### **T1.3 Cursos y formaciones**

Se han realizado dos cursos necesarios para manipular elementos y máquinas de laboratorio. El primer curso se trata de un curso sobre Seguridad y Prevención de Laboratorio, en el que se enseñan no solo a tomar las medidas de seguridad necesarias, sino a manejar la mayoría de los aparatos y máquinas de ensayo, así como a tratar los resultados obtenidos. El segundo curso se trata de un curso exprés sobre el manejo del SEM para obtener unas sencillas y rápidas imágenes sin entrar en mucha profundidad en el manejo de esta máquina compleja.

### **T1.4 Búsqueda bibliográfica y estudio del Estado del Arte**

Esta tarea consiste en analizar, investigar y recopilar artículos, *papers* y otra clase de fuentes de información a través de internet sobre las AA, sus TT y procesos de conformado.

## **T2. Análisis de alternativas**

### **T2.1 Conformado de materiales**

En esta otra tarea se estudian las diferentes alternativas o soluciones de conformar materiales para la fabricación de piezas estructurales para automoción y aeronáutica como la estampación en frío, colada y mecanizado o formas más avanzadas de fabricación como el thixo-forming, además de razonar porqué se ha elegido el proceso de conformado estudiado en vez de los mencionados en este apartado.

### **T2.2 Aleaciones ligeras o de alta resistencia**

Esta tarea consiste en estudiar diferentes tipos de materiales que puedan cumplir con los requisitos de ligereza o alta resistencia como otra clase de aleaciones de aluminio, materiales compuestos o aceros y otra clase de aleaciones. La elección adoptada ha sido tomada y justificada con el software de selección y utilización de materiales llamado *CES Edupack 2017*.

## **T3. Procedimiento experimental**

### **T3.1 Caracterización de Material en estado de compra**

Con la información obtenida y los conocimientos asimilados en la segunda tarea T2 se procede a caracterizar el material en estado de compra para poder definir los futuros parámetros de los TT.

### **T3.2 Optimización de los TT**

Una vez estén completamente caracterizadas las AA, se procede a estudiar los calentamientos y enfriamientos de las piezas y optimizar los parámetros como las temperaturas y tiempos empleados en los TT.

### **T3.2 Análisis del proceso de conformado en estado W-temper**

En esta tarea, se han estudiado las influencias de la deformación y la velocidad de deformación en las propiedades finales de las aleaciones de aluminio en el estado W-temper obtenido después del temple.

## **T4. Redacción del trabajo**

Por último, se lleva a cabo la redacción de la memoria escrita de este trabajo acorde a los resultados obtenidos. En esta memoria se relatarán el estado del arte, análisis de alternativas, la metodología y resultados como el diagrama de Gantt y el presupuesto entre otros muchos documentos de forma ordenada y con sus respectivos índices e ilustraciones.

### 9.3. Diagrama de Gantt/Cronograma

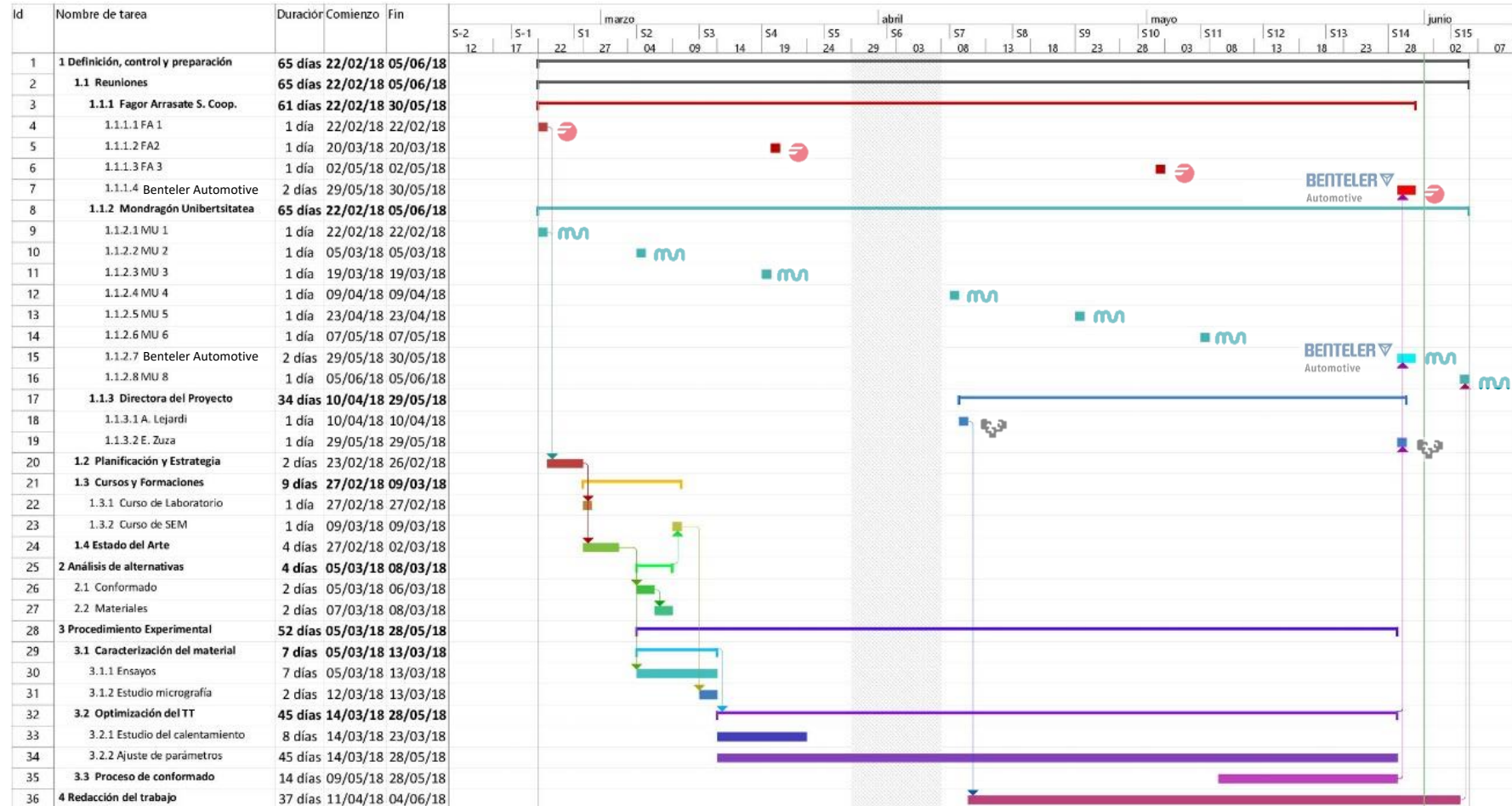


Figura 9.1: Diagrama de Gantt o Cronograma del proyecto

## 10. DESCARGO DE GASTOS

En este punto se procederá a detallar el desglose del presupuesto necesario para llevar a cabo este proyecto dividido en cada una de sus fases.

### 10.1. Coste de recursos humanos

En el coste de recursos humanos o coste de horas internas se tendrán en cuenta tanto las horas que se han invertido para realizar el trabajo por parte del alumno como las horas de reuniones y participación del resto del equipo de trabajo

Directora del proyecto: Dra. Ainhoa Lejardi Meavebasterrechea

Co-directora del proyecto: Dra. Ester Zuza Hernández

Ingeniero en Tecnología Industrial a cargo del proyecto: Unai Ibarreche López

Alumno ayudante de Ingeniería Mecánica: Jon Etxarri Mendizabal

Supervisora del proyecto: Dra. Nagore Otegi

Co-supervisor del proyecto: Dr. Lander Galdos

Responsable y cooperante: Unai Argarate Belategi

Horas internas	Número de horas	Tasa (€/h)	Coste
Directora	8 h	50 €/h	400 €
Co-directora	8 h	50 €/h	400 €
Ingeniero Industrial	600 h	30 €/h	18.000 €
Alumno ayudante	300 h	20 €/h	6.000 €
Supervisora	80 h	50 €/h	4.000 €
Co-supervisor	40 h	50 €/h	2.000 €
Responsable	20 h	40 €/h	800 €
<b>TOTAL</b>			<b>31.600 €</b>

*Tabla 10.1: Partida de coste de recursos humanos y horas de ingeniería*

## 10.2. Coste de Amortizaciones

Dentro del coste de las amortizaciones se contabiliza el gasto generado por el uso de recursos y aparatos electrónicos, como por ejemplo el ordenador, máquinas de tracción, cortadoras, centros de mecanizado, microscopios etc... que además también pueden volver a ser utilizados para realizar otros proyectos. A su vez se tendrán en cuenta las licencias de softwares y hardwares informáticos necesarios para la correcta realización del trabajo.

Amortizaciones	Coste total	Horas utilizadas	Horas útiles	Coste parcial
Ordenador	900 €	320 h	8000 h	33,75 €
SolidWorks	2.000 €	10 h	3000 h	13,33 €
Gantt Project	869 €	10 h	3000 h	1,74 €
Microsoft office	559 €	250h	3000 h	46,58 €
Softwares de Laboratorio	6.000 €	130 h	3000 h	18,00 €
Horno eléctrico con vent.	18.000 €	50 h	10.000 h	90,00 €
Horno eléctrico sin vent.	13.000 €	10 h	10.000 h	13,00 €
Horno de Envejecimiento	2200 €	500 h	20.000 h	55,00 €
Micro dureza Vickers	30.000 €	10 h	20.000 h	15,00 €
Máquina de Tracción	60.000 €	160 h	20.000 h	480,00 €
Prensa (Compresión)	90.000 €	50 h	20.000 h	225,00 €
DSC	42.000 €	12 h	20.000 h	25,20 €
SEM	550.000 €	6 h	20.000 h	165,00 €
Centro de Mecanizado	250.000 €	9 h	10.000 h	180,00 €
Cizalla hidráulica	18.000 €	2 h	10.000 h	3,60 €
Sierra eléctrica	2.900 €	1 h	10.000 h	0,29 €
Otros equipos Laboratorio	20.000 €	25 h	20.000 h	25,00 €
Otras máquinas Taller	30.000 €	15 h	10.000 h	45,00 €
			<b>TOTAL</b>	<b>1.435,49 €</b>

Tabla 10.2: Partida de coste de Amortizaciones



### 10.3. Coste de recursos materiales y servicios

Como gastos materiales para este trabajo, se tendrán en cuenta todos los materiales y servicios utilizados que no se puedan volver a usar para otros trabajos, es decir, de un único uso y que no sean reutilizables. Por ejemplo, las chapas de 2000 x 1000 mm de las AA, de tres distintos grosores (1.5mm, 2mm y 3mm), y el viaje a Paderborn para realizar la visita a Benteler Automotive.

Gastos		Coste unitario	Cantidad	Coste
AA7075	1.5 mm	72,60 €	1	72,60 €
	2 mm	96,80 €	1	96,80 €
	3 mm	145,15 €	3	435,45 €
AA6082	1.5 mm	46,98 €	1	46,98 €
	2 mm	70,20 €	1	70,20 €
	3 mm	105,30 €	2	210,60 €
Viaje a Paderborn		474,72 €	1	474,72 €
			<b>TOTAL</b>	<b>1.407,35 €</b>

*Tabla 10.3: Partida de coste de recursos materiales*

Es preciso mencionar además que el coste en subcontrataciones es nulo, ya que no ha hecho falta contratar ninguna agencia, empresa o personal externo para la realización de este proyecto.

### 10.4. Costes indirectos

Se tendrán en cuenta como costes indirectos aquellos que no puedan atribuirse directamente al trabajo, como gastos y problemas imprevistos, material adicional de laboratorio como bombonas presurizadas de Argón y Nitrógeno para los equipos de laboratorio, o taladrina y otros lubricantes para las maquinas del taller. En este caso se les asignará un valor del 5 % del subtotal, es decir, los costes indirectos serán el 5 % de la suma del total de los conceptos anteriormente mencionados. Dicho valor asciende a los 1722,14 €.



## 10.5. Presupuesto final

A continuación, queda presentado el completo coste del proyecto y su descargo de gastos total según los principales conceptos:

Concepto	Coste
Horas internas	31.600,00 €
Amortizaciones	1.435,49 €
Gastos	1.407,35 €
Subcontrataciones	0,00 €
<b>Subtotal</b>	<b>34.442,84 €</b>
Costes indirectos (5%)	1722,14 €
<b>TOTAL</b>	<b>36.164,98 €</b>

Tabla 10.4: Resumen y partida total de descargo de gastos

## 11. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En este apartado se hará una breve explicación de las conclusiones más importantes extraídas de los resultados de este trabajo y sus consecuencias en el ámbito de la mecatrónica y el sector industrial, así como las nuevas oportunidades y líneas de investigación que se abren gracias a este proyecto.

En primer lugar, cabe destacar que la adecuada ejecución de todos los experimentos **requiere un amplio conocimiento de las máquinas y equipos de laboratorio, sobre la preparación de muestras, e interpretación y tratamiento de resultados**. No solo hay que saber llevarlos a cabo, sino que es de suma importancia conocer y saber desenvolverse en todos y cada uno de los ámbitos de la ingeniería con los que se está trabajando, como la ingeniería mecánica, la ingeniería del diseño y la fabricación o la ingeniería de materiales, con el fin de minimizar tiempos innecesarios de aprendizaje y climatización. Por tanto, un conocimiento base en equipos experimentales de laboratorio y maquinaria de taller implican una clara ventaja a la hora de realizar esta clase de proyectos.

La alta densidad de experimentos y ensayos, procesos de fabricación, y conocimientos e información que se encierran tras este proyecto hace que llevarlo a cabo requiera de extensos periodos de tiempo. Por eso **es vital planificar y ordenar** a la perfección cada operación con el fin de prevenir tanto incoherencias al redactar como errores al calcular y diseñar cada una de las pautas y tratamientos en hornos, que son muy extensos.

Las conclusiones más relevantes de este trabajo están directamente ligadas a los resultados obtenidos en los experimentos. Uno de los objetivos de este trabajo era caracterizar el material en estado de compra. Los resultados de estas caracterizaciones muestran que las **chapas de AA6082 T4 y AA7075 T6 vienen adecuadamente tratadas**, ya que cumplen con los valores de resistencia y elongación establecidos en la norma descrita en el estado del arte (Tabla 5.5). Además, ha sido posible determinar el tamaño y tipo de precipitados, su composición y temperaturas de fusión de los principales constituyentes. De modo que se **dispone de una base de datos fiable** para futuras investigaciones y experimentos de una Tesis Doctoral por parte del alumno. Estas futuras investigaciones están dirigidas a una caracterización más profunda en la que **se analizarán** no solo las **AA** en estado de compra, sino **en estado W-temper y con las propiedades finales** para justificar la disolución y aparición de los precipitados durante los procesos.

Otras de las indudables conclusiones que se pueden extraer de este trabajo es que la optimización de las temperaturas y tiempos de los TT, y su efecto en las propiedades finales podrían ser sumamente beneficiosas en cualquier proceso industrial. Gracias a todos estos

ajustes de parámetros sería posible **realizar una adecuada inversión en un tipo de horno en concreto, reducir tiempos en estos hornos** y, en consecuencia, **abaratarse los costes de producción** favoreciendo un proceso **de fabricación más rápido, flexible** gracias a los tiempos de almacenamiento, **y fiable** para cada tipo de material específicamente. Toda esta información, y mucha más, contribuiría con la ampliación de la base de datos antes mencionada. Una mayor cantidad de conocimiento, implica un **menor número de problemas y reducción en el tiempo de solución de estos**.

Aunque puede que los tiempos en horno y otra clase de parámetros varíen de un experimento a otro, la empresa o cliente que disponga de esta información podría adaptar dichos tiempos de TT según las especificaciones y propiedades finales que quiera conseguir. Por lo que no hay parámetros totalmente óptimos para un proceso genérico, sino que la **relación entre tiempos de TT y propiedades finales puede ser adaptadas al gusto del consumidor**, lo que se conoce como *“Taylor-made”*. Indudablemente, estos experimentos abren una nueva vía de ensayos en el futuro, ya sean con otras aleaciones o con otros métodos de calentamiento más rápidos y modernos.

Las velocidades de temple, entre otros muchos parámetros, **podrían ser simulados por ordenador en un futuro durante la Tesis Doctoral**. Para ello solo sería necesario diseñar un modelo matemático en base a los experimentos ya realizados, implementarlo en un programa de simulación, y así poder prever los resultados de los futuros ensayos. **Esta herramienta** sería muy beneficiosa para cualquier entidad como las empresas, ya que **podrían optimizar, mejorar y prever los distintos métodos de temple** en base a experimentos ya realizados. Aunque la curva de temple empleada no pertenezca a las AA empleadas en este trabajo, se **podría crear una nueva curva “C” para cada material mediante futuros experimentos**, lo que sería muy beneficioso a nivel académico.

Para concluir, se debe destacar la mejora que este proyecto podría suponer en la reducción de peso de los vehículos si estas AAAR son implementadas con mayor asiduidad en vehículos de gama baja. De modo que, se comparará la AA7075 T6 obtenida en este proyecto con un valor de UTS de 750 Mpa y una deformación máxima del 15 %, frente a un AHSS de tipo DP con la misma deformación máxima. Este tipo de DP presentan un valor de UTS de hasta 1000 MPa. Suponiendo que disponemos de una pieza estructural de ambos materiales que resisten las mismas cargas, la pieza de AA7075 T6 tendría una sección 33,33 % mayor que la pieza de DP1000, por lo que sería ligeramente más gruesa y presentaría un volumen mayor. Pero teniendo en cuenta que la densidad del aluminio es tres veces inferior a la del acero, a pesar de que el volumen del aluminio fuera 33% mayor, el **peso total de la pieza se vería reducido en un 44,33 %**. Esta reducción de peso acarrearía una **reducción mayor en el consumo de combustible** y un porcentaje de **reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> aún mucho mayor**.



---

En definitiva, es preciso mencionar que llevar a cabo el desarrollo, mejora y la optimización de procesos de *Hot Stamping* para el aligeramiento de piezas estructurales de aleaciones de aluminio de alta resistencia **aporta un amplio conocimiento, supone un enorme avance tecnológico en el sector de la automoción y aviación, y mejora tanto la productividad y eficiencia de la empresa, como la sostenibilidad con el medio ambiente.**

## 12. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Landa Lazcano, P., Apuntes de ALUMINIOS Y SUS ALEACIONES, II de Master en Ingeniería Industrial, especialidad en Ingeniería de Materiales Curso 2017-2018.
- [2] Y. Chen \*, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad, M. Langseth, Stress–strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates, pp. 325-332, 2009.
- [3] Xiaochuan Liua, Omer El Fakira, Lichun Mengb, Xiaoguang Sunb, Xiaodong Lib, LiLiang Wangc, Effects of lubricant on the IHTC during the hot stamping of AA6082 aluminium alloy: Experimental and modelling studies, 2018
- [4] S.L. Yan, H. Yang\*, H.W. Li\*\*, X. Yao, Variation of strain rate sensitivity of an aluminum alloy in a wide strain rate range: Mechanism analysis and modeling, 2016
- [5] V. Ramaswamy, Rajendra Pareeka, Anirban Girib, Gopal Anugulab, Vivek Srivastavab, Saikat Adhikarib,\*, Corrosion performance evaluation of aluminum alloys for automotive Applications, 2012
- [6] Grażyna Mrówka-Nowotnik, Jan Sieniawski \*, Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys, 2005
- [7] R.C. Picua,\*, G. Vinczeb, F. Ozturka, J.J. Graciob, F. Barlatb,c, A.M. Maniatty, Strain rate sensitivity of the commercial aluminum alloy AA5182-O, 2005
- [8] Asdrúbal Valencia Giraldo\*Profesor Emérito, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia., LAS ALEACIONES ALUMINIO – LITIO, 2006
- [9] C.C. Tasan,1 M. Diehl,1 D. Yan,1 M. Bechtold,2 F. Roters,1 L. Schemmann,3 C. Zheng,4 N. Peranio,5 D. Ponge,1 M. Koyama,6 K. Tsuzaki,6 and D. Raabe1, *An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design*, 2015
- [10] GEORGE E. TOTTEN and GLENN M. WEBSTER, CHARLES E. BATES, *Quenching Aluminum Components in Water: Problems and Alternatives*, 1998
- [11] Lacoste, Juan L., Cozzarín, Ana L (\*).; González, Alfredo C., *ESTUDIO DE ALEACIÓN DE ALUMINIO DE ALTA RESISTENCIA*, 2015

- [12] Yangchun Donga,\*, Kailun Zhengb, Jonathan Fernandezc, Gonzalo Fuentesc, Xiaoying Lia, Hanshan Donga, *Tribology and hot forming performance of self-lubricious NC/NiBN and NC/WC:C hybrid composite coatings for hot forming die, 2018*
- [13] E. Cadoni<sup>1</sup>, M. Dotta<sup>1</sup>, D. Forni<sup>1</sup>, S. Bianchi<sup>2</sup>, and H. Kaufmann<sup>2</sup>, *Strain rate effects on mechanical properties in tension of aluminium alloys used in armour applications, 2012*
- [14] R.P. Garrett, J. Lin \*, T.A. Dean, *An investigation of the effects of solution heat treatment on mechanical properties for AA 6xxx alloys: experimentation and modelling, 2005*
- [15] Nia R. Harrison and S. George Luckey, *Hot Stamping of a B-Pillar Outer from High Strength Aluminum Sheet AA7075, 2014*
- [16] Kang Ji, Xiaochuan Liu, Omer El Fakir, Jun Liu, Qunli Zhang, and Liliang Wang\*, *Determination of the Interfacial Heat Transfer Coefficient in the Hot Stamping of AA7075, 2016*
- [17] A. JOSHI, C. R. SHASTRY, AND M. LEVYA. , *Effect of Heat Treatment on Solute Concentration at Grain Boundaries in 7075 Aluminum Alloy, 1981*
- [18] J. GILBERT KAUFMAN, PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS *Fatigue Data and the Effects of Temperature, Product Form, and Processing, 2008*
- [19] Dipl.-Ing. Torsten Grohmann, MBA,  
*Forming of AMAG 7xxx Series Aluminium Sheet Alloys, 2012*
- [20] RICHARD DeIASI AND PHILIP N. ADLER, *Calorimetric Studies of 7000 Series Aluminum Alloys: I. Matrix Precipitate Characterization of 7075, 1977*
- [21] Anton Smolej<sup>1</sup>, \*, Brane Skaza<sup>1</sup> , Matevž Fazarinc<sup>1</sup>, *Determination of the strain-rate sensitivity and the activation energy of deformation in the superplastic aluminium alloy Al-Mg-Mn-Sc, 2009*
- [22] D. SHAO, P. ZHANG, J.Y. ZHANG, G. LIU, R.H. WANG, W.Q. LIU, G. SHA, and J. SUN, *Effect of Pre-strain on the Solute Clustering, Mechanical Properties, and Work-Hardening of a Naturally Aged Al-Cu-Mg Alloy, 2017*
- [23] Z Shao<sup>1</sup>, N Li<sup>1</sup> and J Lin<sup>1</sup>, *The comparison of two continuum damage mechanics-based material models for formability prediction of AA6082 under hot stamping conditions, 2004*

- [24] J.T. Staley, M. Tiryakioğlu, *The Use of TTP Curves and Quench Factor Analysis for Property Prediction in Aluminum Alloys*, 2001
- [25] Marco Antonio Ruiz Esparza Rodríguez<sup>1</sup>, Carlos Gamaliel Garay Reyes<sup>2</sup>, Roberto Martínez Sánchez<sup>2</sup>, *El aluminio, material trascendente en la historia humana*, 2006
- [26] D. Vergara y J. Toribio, *INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN SOBRE LA FRACTURA ASISTIDA POR HIDRÓGENO EN ACERO EUTECTOIDE*
- [27] Aluminum: Properties and Physical Metallurgy - Google Books
- [28] Classification of aluminum alloys [SubsTech]
- [29] Aleaciones de aluminio - Información técnica del Aluminio · Alu-Stock S.A.
- [30] ALUMINIIO y SUS ALEACIONES.pdf
- [31] Technalloy | Las aleaciones de aluminio en la aviación
- [32] ALUMINIO. USO EN EL AUTOMÓVIL.
- [33] El uso del aluminio en la automoción - REVISTA DE INGENIERIA DYNA
- [34] Productor de aluminio laminado para componentes de automóviles.
- [35] Aluminio en el sector de la automoción | INDEXAL
- [36] El aluminio en la carrocería del vehículo: propiedades, ventajas e inconvenientes | GT Motive
- [37] Historia del aluminio en el automóvil
- [38] Tin Machines: 5 Cool Aluminum Cars | Web2Carz
- [39] What are some examples of cars which have aluminum body? - Quora
- [40] Aluminum and Art Meet in Hybrid Jaguar Concept Car - Steel, Aluminum, Copper, Stainless, Rare Earth, Metal Prices, Forecasting | MetalMiner zoomcars



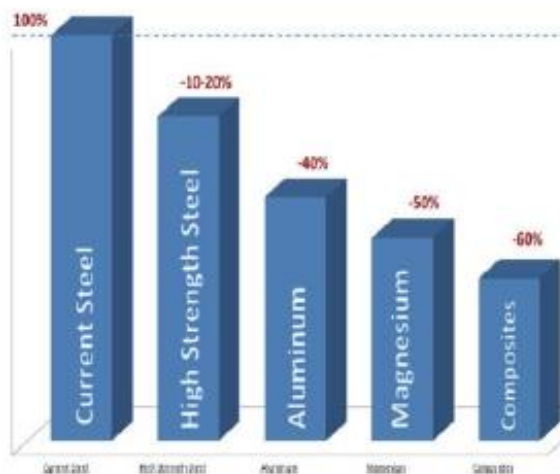
- [41] Figure 1: Weight saving potential of an aluminum intensive vehicle with respect to a 1229 kg steel compact class reference car. | Scientific Diagram
- [42] Bugatti Royale: la elegancia clásica más cara del mundo - Ecomotor.es
- [43] Energía eléctrica en España - Wikipedia, la enciclopedia libre
- [44] Las emisiones contaminantes de los coches - Twenergy
- [45] Fabricación de Aluminio de Alta Resistencia por Mecanosíntesis y Sinterización. - Fondos Digitalizados de la Universidad de Sevilla
- [46] Fabricación de aluminio de alta resistencia por mecano-síntesis y sinterización - Dialnet
- [47] Manual del Aluminio y sus Aleaciones | Ingeniería de Materiales.
- [48] Estudio de aleación de aluminio de alta resistencia
- [49] Aleaciones de aluminio - Wikipedia, la enciclopedia libre
- [50] APLICACIONES DEL ALUMINIO — Universidad de Cádiz
- [51] Hornos industriales: resistencias eléctricas, tipos y usos
- [52] Encuentra aquí información de Hornos industriales para tu escuela ¡Entra ya! | Rincón del Vago
- [53] Solución y envejecimiento: Aleaciones de níquel – Bodycote plc
- [54] GESTAMP - Gestamp
- [55] Small Block Gen 5. La nueva generación del Chevy V8 | Sobre Ruedas FM
- [56] Practical Maintenance » Blog Archive » Phase Diagrams (Part 2)
- [57] Blacksmith At Work Photograph by Aberration Films Ltd
- [58] Blacksmithing: Essential Tools, Techniques & Methods :: The Consummate Dabbler

- [59] 2018 Audi A8 Body Structure – Boron Extrication
  
- [60] Analysis of precipitate density of an aluminium alloy by TEM and AFM
  
- [61] Plastic and Viscoplastic Material Behaviours ?
  
- [62] A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration - ScienceDirect
  
- [63] Las desventajas de la fundición de metales
  
- [64] Moldeo de metales en estado semisólido - Wikipedia, la enciclopedia libre
  
- [65] Inicio | Home - Nabertherm – construcción de hornos industriales
  
- [66] Microscopio electrónico de barrido - Wikipedia, la enciclopedia libre
  
- [67] Carbon Fiber Interior Parts Installed On A BMW F82 M4
  
- [68] Semi-Solid Thixoforming: Part One :: Total Materia Article
  
- [69] Grupo-Selecta
  
- [70] Zwick Roell Materials Testing Systems
  
- [71] STA 449 F3 Jupiter® - NETZSCH Análisis y Ensayo
  
- [72] annurev-matsci-070214-021103.pdf
  
- [73] Cizalla Hidráulica C2006 CNC | Prada Nargesa

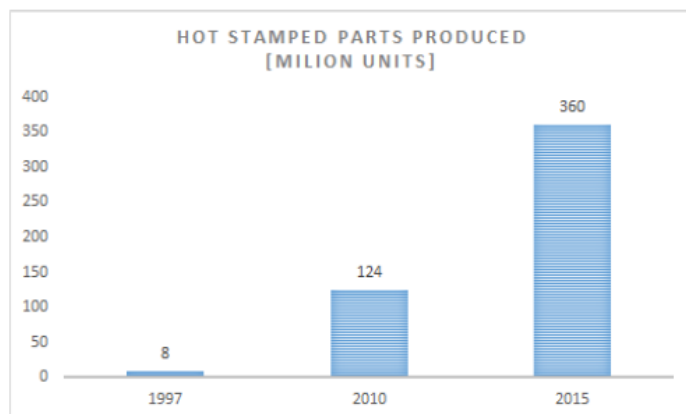
## 13. ANEXOS

En este anexo se adjuntarán todos y cada uno de los planos, dibujos de máquina, cálculos, esquemas, diseños de detalle y mucha más información que puede llegar a ser útil, pero no imprescindible, para la correcta comprensión de este trabajo. Dicha información puede servir para complementar los conocimientos adquiridos durante este trabajo y para indagar aún más en las entrañas del proyecto denominado “Desarrollo, mejora y optimización de procesos de Hot Stamping para el aligeramiento de piezas estructurales de aleaciones de aluminio de alta resistencia”.

### 13.1. ANEXO I: Planos, esquemas, cálculos y diseños detalle



Gráfica 13.1: Potencial de la reducción de peso de varios materiales

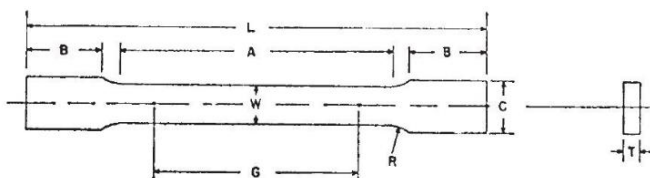


Gráfica 13.2: Componentes fabricados por Hot Stamping



Figura 13.1: Cizalla hidráulica Nargesa C-2006 con CNC de la MGEP.

ASTM E 8M - 04



Dimensions, mm			
Nominal Width	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type 40 mm	Sheet-Type 12.5 mm	6 mm
G— Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W— Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T— Thickness (Note 5)		thickness of material	
R— Radius of fillet, min (Note 6)	25	12.5	6
L— Overall length, (Note 2, Note 7 and Note 8)	450	200	100
A— Length of reduced section, min	225	57	32
B— Length of grip section, (Note 8)	75	50	30
C— Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50	20	10

Figura 13.2: Diseño y medidas normalizadas de las probetas para los ensayos de tracción



Figura 13.3: Probetas de 200 y 100 mm de largura de AA7075 y AA6082, fracturadas dúctilmente y sin fracturar.



Figura 13.4: Horno eléctrico Nabertherm N250/84HA con ventilador de la MGEP.



Figura 13.5: Horno eléctrico Nabertherm LH60/14 sin ventilador de la MGEP.



Figura 13.6: Horno eléctrico J.P. Selecta S.A con ventilador de la MGEP.

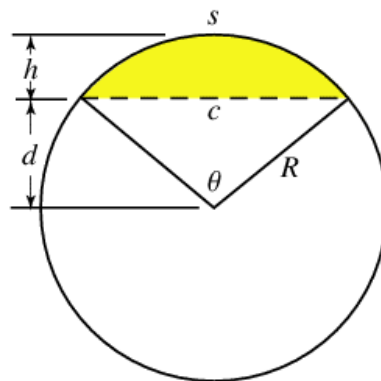


Figura 13.7: Durómetro ZHV10 Vickers de Zwick Roell en la MGEP.

• Tensión ingenieril	$\sigma = \frac{F}{A_0}$	$\sigma_R$ y $\sigma$ coinciden en la zona elástica, pero no en la zona plástica
• Tensión verdadera	$\sigma_R = \frac{F}{A}$	

• Deformación ingenieril	$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$	$\epsilon_R$ y $\epsilon$ coinciden solo en la zona elástica
• Deformación verdadera	$d\epsilon = \frac{dl}{l} \Rightarrow \epsilon_R = \ln \frac{l}{l_0}$	

Tabla 13.1: Calculo de las tensiones y deformaciones reales a partir de las ingenieriles.



$$R^2 \cos^{-1} \left( \frac{R-h}{R} \right) - (R-h) \sqrt{2Rh - h^2},$$

**Figura 13.8:** Cálculo del área amarilla mediante fórmula matemática para el cálculo de la superficie de las probetas

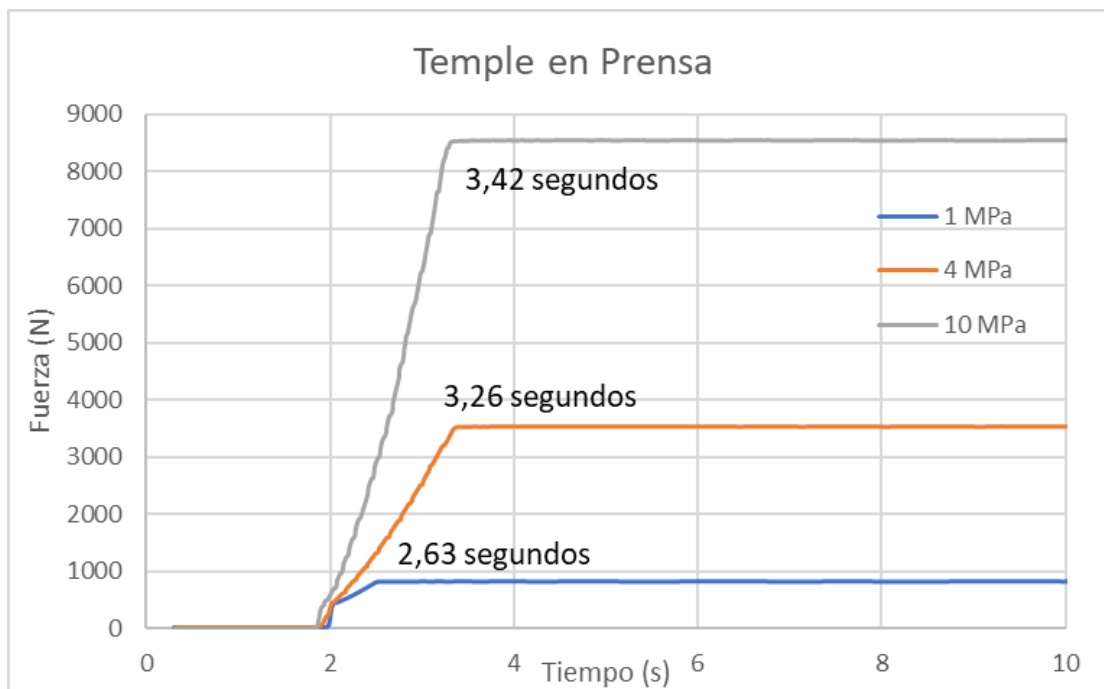
<b>Superficie real</b>	<b>834,56 mm</b>
<b>Superficie teorica</b>	<b>847,22 mm</b>

**Tabla 13.2:** Área real y teórica de las probetas pequeñas de tracción de 100 mm de largo.

<b>Presión (MPa)</b>	<b>Fuerza real (N)</b>	<b>Fuerza teórica (N)</b>
<b>1</b>	<b>834,56</b>	<b>847,22</b>
<b>4</b>	<b>3338,22</b>	<b>3388,88</b>
<b>10</b>	<b>8345,55</b>	<b>8472,20</b>

**Tabla 13.3:** Cálculo de la fuerza ejercida por la prensa para alcanzar la presión requerida para el temple.





**Gráfica 13.3:** *Curvas Fuerza-tiempo ejercidas por la prensa para templar las piezas a distintas presiones y el tiempo en alcanzar dicha fuerza.*



**Figura 13.9:** *Termopares de 1 mm de diámetro de tipo "K" empleados para medir los perfiles de temperatura*

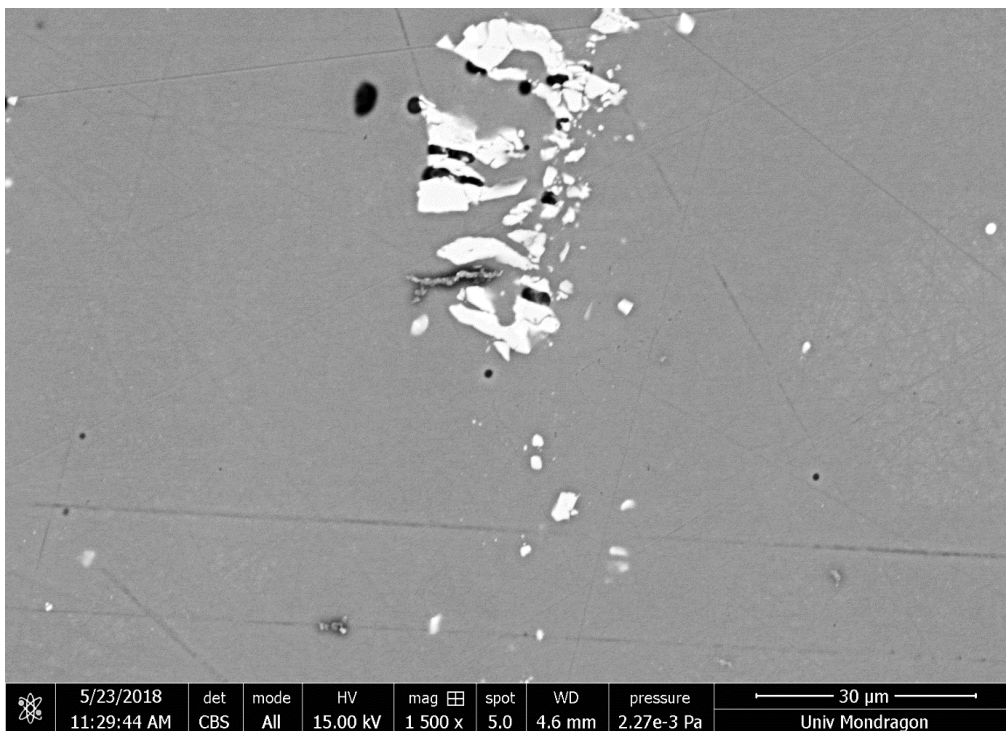


Figura 13.10: Imagen SEM a 1.500 aumentos con aglomeración de clúster rotos por el proceso de laminación en la AA6082

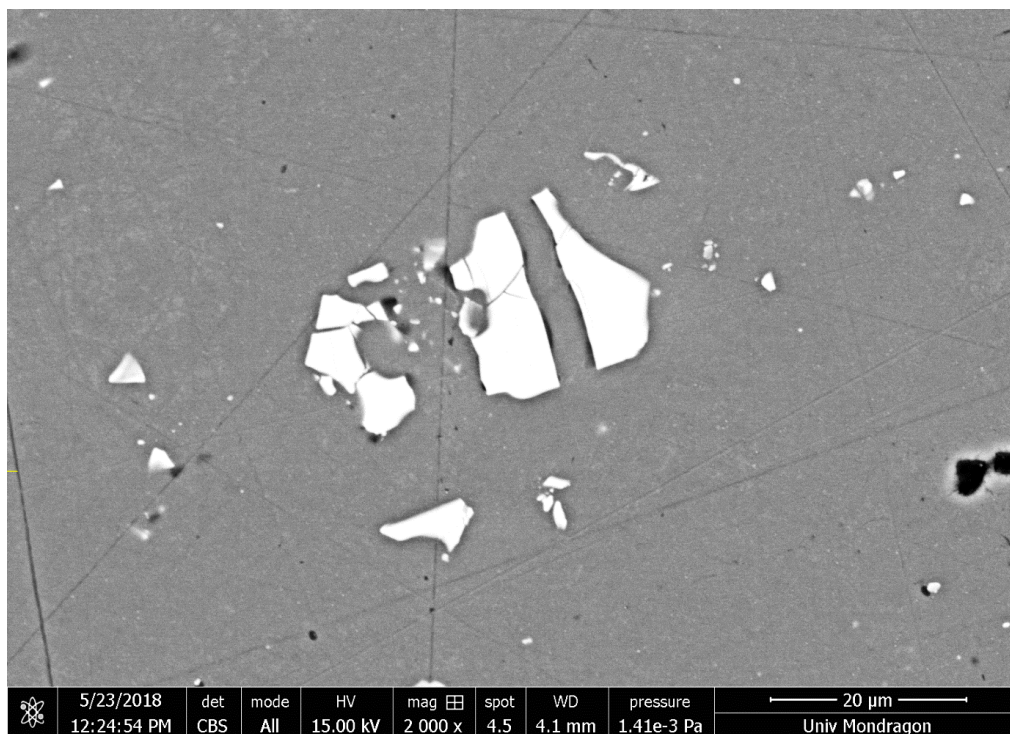


Figura 13.11: Imagen SEM a 2.000 aumentos con aglomeración de clúster rotos por el proceso de laminación en la AA7075