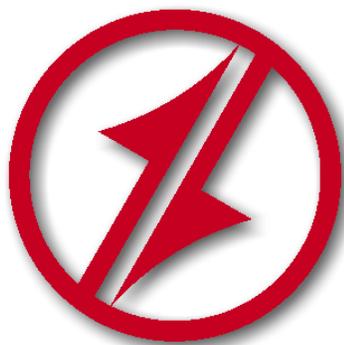


**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



***“RECUPERACIÓN DE DATOS PARA ESTAMPADO DE ACERO GRADO D2  
MEDIANTE PROCESOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA  
AUTOMOTRIZ”***

**POR**

**ING. CARLOS ALBERTO GUEVARA CHÁVEZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, 9 DE OCTUBRE DEL 2009**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



***“RECUPERACIÓN DE DATOS PARA ESTAMPADO DE ACERO GRADO D2  
MEDIANTE PROCESOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA  
AUTOMOTRIZ”***

**POR**

**ING. CARLOS ALBERTO GUEVARA CHÁVEZ**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA  
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, 9 DE OCTUBRE DEL 2009**

## **PROLOGO**

La soldadura de mantenimiento y los revestimientos duros, prolongan la vida útil del componente al obtener altos rendimientos y reducir el número de fallas. Los avances tecnológicos en la soldadura, provee a las industrias, uno de los medios más eficaces para combatir el desgaste prematuro, adelantándose a la falla o al momento que el equipo deja de trabajar en sus condiciones óptimas. De esta forma se optimiza la disponibilidad de la maquinaria, se disminuye el costo de mantenimiento y se maximiza la vida útil. Los diferentes procesos de soldadura aplicados al mantenimiento industrial tiene el propósito de aumentar la disponibilidad inmediata de repuestos, disminuir costos de reparaciones ó de tiempos muertos debido al constante intervención en cuanto la reparación del componente, es por ello que el llevar una metodología adecuada es un factor de suma importancia.

# ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
<b>Síntesis</b>	1
<b>Capitulo 1. Introducción</b>	3
1.1.- Antecedentes	5
1.2.- Planteamiento del problema	7
1.3.- Objetivo general	9
1.3.1.- Objetivos específicos	9
1.4.- Justificación	10
1.5.- Aportación científica tecnológica	11
1.6.- Alcances	12
<b>Capitulo 2. Antecedentes de la reparación del acero grado herramienta AISI/SAE D2 por soldadura convencional</b>	13
2.1.- Aceros herramienta para trabajo en frío	14
2.2.- Aceros herramienta para trabajo en caliente	14
2.3.- Aceros para moldes de plástico	14
2.4.- Característica de los aceros para herramienta	16
2.5.- Mecanismo de desgaste presentes durante la operación de conformado de metales	19
2.5.1.- Abrasión	20
2.5.1.1.- Abrasión bajo esfuerzo	21
2.5.1.2.- Abrasión por desgarramiento	22
2.5.2.- Impacto	23
2.5.3.- Fricción	25
2.6.- Soldadura aplicada para la recuperación de los aceros para herramientas	27
2.7.- Recomendaciones generales para la soldadura de aceros para Herramientas	30
2.7.1.- Metales de aporte	33
2.8.- Pre calentamiento	34
2.9.- Técnicas fundamentales para la reparación de herramientas por medio de procesos de soldadura convencionales.	37
2.10.- Tratamiento térmico aplicado en aceros grado herramienta	41
2.10.1.- Generalidades	43
2.10.2.- Temple y revenido de los aceros herramientas	43
2.10.3.- Austenitización	43
2.10.4.- Enfriamiento	45
2.10.5.- Revenido	45
2.11.- Proceso de templado para aceros herramientas para trabajo en frío	47
2.12.- Control de la distorsión en acero grado herramienta AISI D2	52
2.12.1.- Naturaleza y causas de la distorsión	52
2.12.2.- Efecto de la Austenitización sobre la distorsión	53
2.12.3.- Efecto del Temple sobre la distorsión	54

2.12.4.- Efectos del revenido sobre la distorsión	54
2.12.5.- Efecto de la Austenita retenida sobre la distorsión	55
2.13.- Distorsión de forma en el acero AISI D2	56
<b>Capitulo 3. Alternativa de tratamiento térmico para el mejoramiento de la microestructura de los aceros herramientas para trabajo en frio</b>	58
3.- Tratamiento térmico de los aceros herramientas para trabajo en frio	58
3.1.- Evaluación del comportamiento de desgaste	60
3.2.- Composiciones químicas y curvas del revenido	61
<b>Capitulo 4. Proceso de proyección térmica como alternativa de reparación de herramientas de conformado</b>	64
4 Introducción a la Proyección térmica	64
4.1 Método de proyección por plasma	67
4.1.1 Técnica de la proyección por plasma	67
4.1.1.1 Cañón de plasma	67
4.1.1.2.- Inyección del polvo	69
4.2.- Parámetros a considerar	69
4.2.1.- Gases plasmógenos	69
4.2.2.- Tamaño de partícula de polvo	70
4.2.3.- Modo de inyección del polvo	70
4.2.4.- Distancia al sustrato	71
4.2.5.- Velocidad de las partículas	71
4.2.6.- Interacción de las partículas con el sustrato	72
4.2.7.- Atmósfera de protección	73
4.3.- Aplicaciones	74
4.4 Alta velocidad (HVOF)	75
<b>Capitulo 5. Discusión del estado del arte</b>	81
<b>Capitulo 6. Conclusiones</b>	84
<b>Bibliografía</b>	86
<b>Lista de Figuras</b>	90
<b>Lista de Tablas</b>	93
<b>Resumen Autobiográfico</b>	94

## SÍNTESIS

En la actualidad en la industria automotriz, resalta la importancia de minimizar costos, eficientar la producción y hacer que la industria produzca materiales de primera calidad. Bajo este ámbito y el que prevalece desde el punto de vista económico impera la necesidad de recuperar componentes que hasta hace poco tiempo se consideraba de desperdicio. La recuperación de componentes en la industria automotriz por medio de soldadura; se considera como una de las tecnologías emergentes, tanto por el relativo poco tiempo de desarrollo como por la continua evolución que sigue teniendo hasta estos días. Existe la creencia equivocada de que a nivel industrial, la política con respecto al desgaste de piezas consiste en el remplazo de componentes desgastados por nuevos, no existiendo económica en su reparación. Por el contrario, mientras mayor eficiencia operacional y desarrollo tecnológico alcanza la industria, mayor es su inclinación hacia la recuperación de partes y piezas, así es el caso de la industria automotriz, caracterizada mundialmente por sus estándares de eficiencia y confiabilidad.

La protección antidesgaste y/o recuperación de piezas ha dado origen a un nuevo concepto dentro de la ingeniería. Ya que el ingeniero no solo debe analizar los aspectos técnico-económico para determinar la factibilidad de recuperación, sino también referente a esto no sería parte de los aspectos técnicos, procedimientos y materiales a emplear. Para efectuar dicho análisis se debe recurrir a conocimientos de mecánica, metalurgia, química y resistencia de materiales, entre otros, así como también a técnicas de evaluación económica. En forma resumida la prolongación de la vida útil de partes y piezas se ha logrado mediante el desarrollo de dos grandes áreas:

1. La aplicación de un recubrimiento protector antidesgaste, aplicado preventivamente en el componente nuevo o como parte de un proceso de recuperación de la pieza.
2. La reparación con soldadura de partes y piezas que han sufrido roturas y/o desprendimiento.

Es así como en un comienzo el campo de la recuperación de piezas y partes es ocupado por la tecnología de la soldadura.

En el presente trabajo se hace una recopilación informativa acerca de los aspectos esenciales a tener en cuenta durante la soldadura de reparación de herramientas de conformado, donde se incluye las características metalográficas, propiedades mecánicas de los aceros grado herramienta, procedimientos y parámetros tecnológicos recomendados para la recuperación por soldadura de estos aceros, así como los consumibles más utilizados para su soldadura y las técnicas fundamentales utilizadas con este fin.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El proceso tecnológico de conformación de metales tiene una característica esencial la cual consiste en el alto costo de las herramientas que intervienen en el mismo. Estas generalmente están sometidas a severas condiciones de trabajo, tales como el desgaste en sus zonas de trabajo, cargas de impacto, trabajo en caliente, los esfuerzos a tensión ó compresión de su estructura debido a las configuraciones complejas de estas herramientas y por tanto, la no uniformidad en la distribución de las cargas a que se someten, entre otros aspectos. Cada hora gastada en reparaciones y acondicionamiento se añade a los costos de la herramienta por pieza fabricada, la cual debe estar permanentemente produciendo para rebajar ese costo. La salida de funcionamiento de una prensa de una línea de corte o estampado es extremadamente costosa debido a la interrupción de la producción y a la cantidad de personal que está involucrado. Esta es la razón por la cual se hace imprescindible tener a mano una solución factible técnica y económicamente para poner en funcionamiento, en el menor tiempo posible, la herramienta dañada. La utilización de la soldadura de reparación en estos casos es una opción principal, ya que este proceso posibilita devolver a la pieza, con suficiente eficiencia y bajo costo, sus características dimensionales y sus

propiedades mecánicas, que la adecuan para una aplicación específica. La soldadura de reparación de herramientas de conformación requiere de un conocimiento especializado en el tema, donde los procedimientos de soldadura estándares no se adecuan, ni se cuenta con códigos como guía para la obtención de resultados de calidad. No existe en la literatura clásica de soldadura información sustancial al respecto, encontrándose la misma mayormente en artículos científicos o técnicos de revistas especializadas, en catálogos de consumibles o en boletines técnicos de empresas dedicadas a este fin

## ANTECEDENTES

La soldadura de mantenimiento y reparación, a pesar de ser una de las aplicaciones que mayor cantidad de soldadores emplea, cuenta en sentido general con una reputación mal ganada, debido a que el soldador es a veces quien tiene la responsabilidad de intentar reparar el equipo o pieza y no cuenta con la información adecuada para poder realizar dicho trabajo. Este es uno de los métodos más comúnmente empleados en la recuperación de piezas, lo anterior se debe a las posibilidades que brinda para la aplicación de capas de material en zonas desgastadas y la capacidad de reparación de piezas partidas. También se suma a lo anterior la simplicidad y facilidad de maniobra de algunos procesos dentro de este método.

Entre las razones por las que la soldadura de mantenimiento o reparación está carente de reconocimiento como una disciplina independiente y de incuestionable valor económico están las siguientes:

- 1) Los ingenieros aún confían solamente en las técnicas estándar de producción y en los procedimientos disponibles.
- 2) Solamente algunos ingenieros soldadores se especializan en procesos de soldadura aplicado específicamente en el mantenimiento o reparación.
- 3) Algunas firmas comercializadoras de consumibles de soldadura recomiendan productos inadecuados, mientras quieren significar que están ofreciendo un consejo de especialista.
- 4) La carencia o falta de programas de entrenamiento en soldadura de reparación así como de publicaciones autorizadas al respecto.

Se suma a esto la falta de información experta y su divulgación.

La responsabilidad de la función de la soldadura de mantenimiento y reparación es devolver al servicio con suficiente eficiencia y bajo costo, cualquier pieza partida o desgastada en sustitución de una nueva. En este tipo de soldadura, lo desconocido y las restricciones son los aspectos más frecuentes a encontrarse. El metal base puede no tenerse definido, la presencia de contaminantes pueden afectar los resultados, así como los esfuerzos residuales propios de la soldadura también tienen influencia en el resultado final. Otro de los aspectos difíciles de contrarrestar en ocasiones es el de la accesibilidad, ya que hay que trabajar con una pieza que ya está conformada y no es el caso de una producción nueva que puede contemplar un ensamblaje por partes.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El caso que se ocupa en este trabajo se trata de la recuperación de herramientas de conformación, tanto agrietadas, desgastadas o dañadas en las zonas de trabajo. Estas piezas por lo general son relativamente caras. Esto se debe, en primer lugar a la complejidad de la tecnología de fabricación necesaria, dadas las altas exigencias que requieren, que incluye procesos tales como el electro-erosivo, el uso de herramientas con control numérico, tratamientos térmicos, entre otros, además del costo elevado del material, con relación a los aceros de más baja aleación.

A esto se le suma que es un proceso de fabricación relativamente lento, además de esto, en muchas ocasiones puede afectarse el cumplimiento de un volumen de producción a causa de la rotura de una herramienta de conformación y en esos momentos es fundamental tener a mano una solución factible a aplicar para la reparación y puesta en funcionamiento de estas piezas.

Teniendo en consideración lo anteriormente planteado, no quedan dudas de la importancia de aumentar conocimientos y experiencias dentro del tema de la reparación de herramientas de conformación. Este trabajo es un primer paso para alcanzar dicha meta.

En la región existen varias empresas, tales como: Magna, Estampados Martin-Rea, Metal Work Stamping, Metalsa, en las cuales se utilizan para la producción procesos de conformación en los que emplean herramientas, las cuales, luego de perder sus dimensiones de trabajo o sufrir agrietamiento, salen de la producción y son vendidas como materias primas a precios sumamente inferiores a su costo de producción.

Esto se debe a que estas empresas no poseen procedimientos adecuados para la recuperación de este tipo de piezas. En este trabajo se busca obtener información bibliográfica que permita crear una base de información con vistas a enfrentar el trabajo de la recuperación de herramientas de conformación en la industria nacional.

## **1.2. Objetivo general**

Realizar la búsqueda bibliográfica del estado tecnológico que guarda los métodos empleados para la recuperación de dados de estampado de acero grado D2 mediante procesos de soldadura utilizados en la industria automotriz.

### **1.2.1. Objetivos específicos**

- Definir las condiciones de retiro de servicio, recuperación y reemplazo de los dados de estampado.
- Establecer la metodología adecuada para la reparación de los dados de acero grado herramienta D2.
- Definir la causa principal del agrietamiento de los dados de estampado.
- Estudio bibliográfico acerca de las características metalográficas, propiedades mecánicas y tratamientos térmicos de los aceros para herramientas.
- Obtener información acerca procedimientos y parámetros tecnológicos recomendados para la recuperación de herramientas de conformación. Consumibles más utilizados para su soldadura.
- Obtener información acerca de experiencias específicas en la recuperación de herramientas de conformación, reportadas en la literatura.

### **1.3. Justificación**

Hoy, en día nadie cuestiona el hecho de que dadas las restrictivas condiciones económicas en las cuales debe desenvolverse toda actividad, es imprescindible minimizar costos de operación y maximizar el rendimiento de la maquinaria. Buscando siempre la optimización de recursos, esto se observa constantemente en los depósitos de material inservible o fuera de servicio, en la categoría de: fuera de servicio, irreparable, piezas gastadas, no admite reparación, en estado de exclusión, obsoleta, etc., de seguir por este rumbo se concluirá que millones de pesos son anualmente arrojados a la chatarra en el mundo entero, siendo estas últimas depositadas por largos años en bodegas como repuestos que nunca serán utilizados.

Aún hoy en día, expuesta la industria a un cambiante y cada vez más competitivo escenario económico, se encuentra con la realidad de que valiosos recursos productivos no son utilizados eficientemente, debido a que el enemigo número uno de la industria (en este caso la industria automotriz), el desgaste, se ha encargado de retirarlos prematuramente de servicio.

Ahí es donde la importancia de poder recuperar dichos componentes, los cuales podrán volver a ser usados, y así minimizar los costos generados por el desperdicio de piezas que se consideran fuera de servicio y prolongar su vida útil lo anterior bajo la primicia del empleo de procesos de soldadura.

#### **1.4. Aportación científica y tecnológica**

Generar una base de conocimiento en cuanto a la temática de reparación por soldadura de dados para estampado de acero grado D2 utilizado en la industria automotriz, así como otras técnicas alternativas para minimizar la problemática de la recuperación por medio de soldadura.

### **1.5. Alcances**

El alcance de este trabajo consiste en hacer una recopilación de información acerca del estado del arte en la temática de la recuperación de herramientas y los consumibles utilizados con este fin, mediante el uso de procesos convencionales como lo son el shield metal arc welding (SMAW) y gas tungsten arc welding (GTAW) y la posible aplicación de procesos no convencionales tales como high velocity oxi-fuel (HVOF).

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DEL ARTE

### ANTECEDENTES DE LA REPARACIÓN DEL ACERO GRADO HERRAMIENTA AISI/SAE D2 POR SOLDADURA CONVENCIONAL

La mayoría de los procesos industriales envuelve alguna etapa de conformación o corte, en el sector metal-mecánico. En estos procesos, son empleadas herramientas para los más diversos fines, desde calibres y patrones, hasta moldes y matrices complejos y de alta resistencia mecánica. Tales herramientas son normalmente construidas de materiales, denominados aceros herramienta. Estos pueden ser divididos en tres clases básicas, por el ramo de aplicación. (R. Ebner, H Leitner, 1999).

#### 2.1 Aceros herramienta para trabajo en frío

Aceros empleados como herramientas o matrices de procesos de corte y conformación de otros materiales en temperaturas por debajo de 200 °C, típicamente a temperatura ambiente. Se destacan, en esta clase, las aplicaciones de corte y conformación de placas, peines y rollos laminadores de

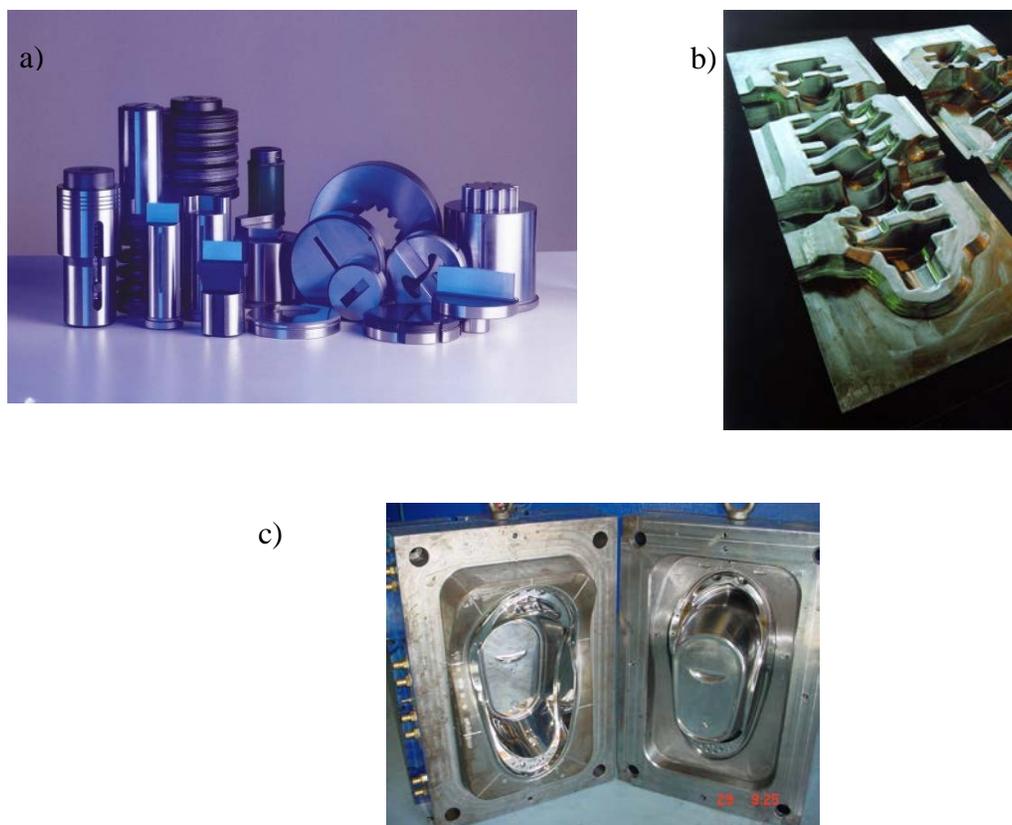
rosca, herramientas para acuñado y forjado en frío. Los aceros herramienta para trabajo en frío poseen como propiedades fundamentales la resistencia mecánica, dada por la alta dureza de esos materiales, y resistencia al desgaste. Para aplicaciones de conformación de metales, para trabajo en frío, en especial en placas de acero, la propiedad de tenacidad también es muy importante. (Steven Thompson 1999).

## **2.2 Aceros herramienta para trabajo en caliente**

Son empleados en la conformación de materiales, especialmente de aleaciones metálicas, en altas temperaturas – por encima de 500 °C. En estos procesos, la temperatura a la cual la herramienta es sometida también influye significativamente en la vida útil. Por lo tanto, las propiedades de los aceros empleados son sustancialmente diferentes de los aceros para trabajo en frío, se destacan dos, las propiedades de resistencia al trabajo en caliente y tenacidad. Las principales aplicaciones se dividen en tres ramos – forjado en caliente de aceros, extrusión en caliente o fundición bajo presión de aleaciones no ferrosas. (Steven Thompson 1999).

## **2.3 Aceros para moldes de plástico**

Utilizados en moldes para inyección, extrusión o soplo de polímeros termoplásticos. En esta clase, se destacan las propiedades del acero herramienta relacionada a la manufactura del molde, en términos de mecanizado, respuesta al tratamiento térmico, soldabilidad y, para casos de polímeros clorados, resistencia a la corrosión. Ejemplo de lo anterior se observa en la figura 2.1. (Steven Thompson 1999).



**Figura 2.1** Aspecto general de moldes utilizados en la industria automotriz: a) molde para trabajado en frío, b) molde para trabajado en caliente, c) molde para inyección de plástico. (Weld mold company 2000).

A diferencia de los aceros de aplicación estructural, los aceros herramienta tienen propiedades que son llevadas al límite en sus aplicaciones constantemente. Por mencionar una matriz de fundición bajo presión de aluminio, siempre poseerá grietas térmicas, dada la rigurosidad de la aplicación. En una herramienta de trabajo en frío, generalmente, es retirada de operación por el desgaste ocurrido en la región de trabajo. Esta alta exigencia aplicada a los aceros herramienta, sea en su utilización manufactura de un molde, incurre en la constante necesidad de mejorar propiedades por parte del acero empleado. (R. Ebner, H Leitner 1999).

## 2.4 Características de los aceros para herramienta

Los aceros para herramientas y matrices están clasificados por el Instituto Americano del Hierro y el Acero por sus siglas en inglés (AISI) y la sociedad de ingenieros automovilísticos, (SAE) en 7 grupos principales (ASM 1993). Esta nomenclatura hace referencia al medio normal de temple o a las aplicaciones generales de estas aleaciones. (H. Berns 1992). Tabla 2.1: clasificación de aceros para herramientas según AISI/SAE.

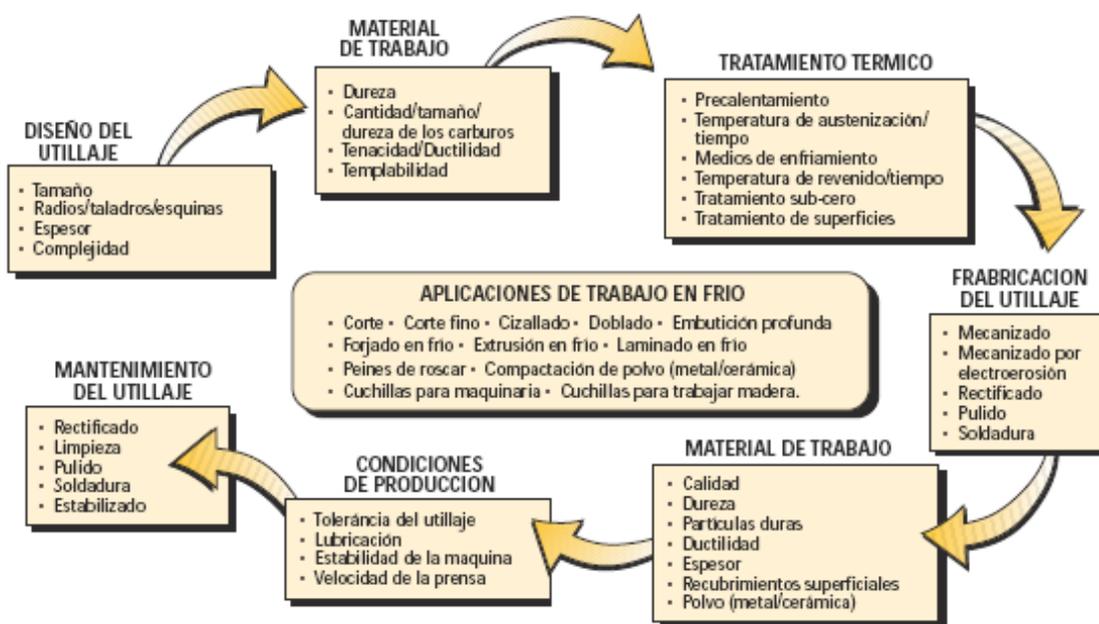
**Tabla 2.1:** Clasificación de aceros para herramientas según AISI/SAE (ASM 1993).

Grupo	Letra símbolo	Tipo
Endurecible al agua	W	Al Carbono
Resistente al choque	S	Medio carbono, bajo aleación
Trabajo en frío	O	Endurecible en aceite
	A	Media aleación endurecible al agua
	D	Alto Carbono, alto Cromo
Trabajo en caliente	H	Cromo (H1-H19)
		Tungsteno (H20-H39)
		Molibdeno (H40-H59)
Acero rápido	T	Tungsteno
	M	Molibdeno
Molde	P	Bajo Carbono
Propósitos especiales	L	Baja aleación

Los grupos están subdivididos en tipos, basados estos en la composición química. Los de baja aleación endurecibles en aceite contienen manganeso y pequeñas cantidades de cromo y tungsteno. Estos presentan muy buenas propiedades de no deformación y están menos propensos a la distorsión o al agrietamiento durante el tratamiento térmico, que los aceros endurecibles en

agua. Debido a su alto contenido de carbono, poseen una adecuada resistencia al desgaste para aplicaciones de jornada corta, a temperaturas cercanas a la ambiente. Ellos presentan buena maquinabilidad y resistencia a la descarburización, tenacidad regular.

Como puede apreciarse en la tabla 2.1, existe una variedad de aceros para herramientas, con un amplio rango de composición química, que va desde aceros al carbono (de alto carbono) hasta aceros de alta aleación, cuyos elementos aleantes más frecuentes son el Cr, Mn, W, Mo y V. En el caso de aplicar soldadura la selección del proceso va a depender del tipo de aceros del cual esté fabricada la herramienta, el tipo de daño que está presente (desgaste ó grieta), el estado de tratamiento térmico en que se encuentre, las características de la zona dañada, entre otros. En la figura 2.2, se observa algunas aplicaciones de los aceros grado herramienta y los factores que influyen en la vida útil de la misma. (Burgos Salas 1996).



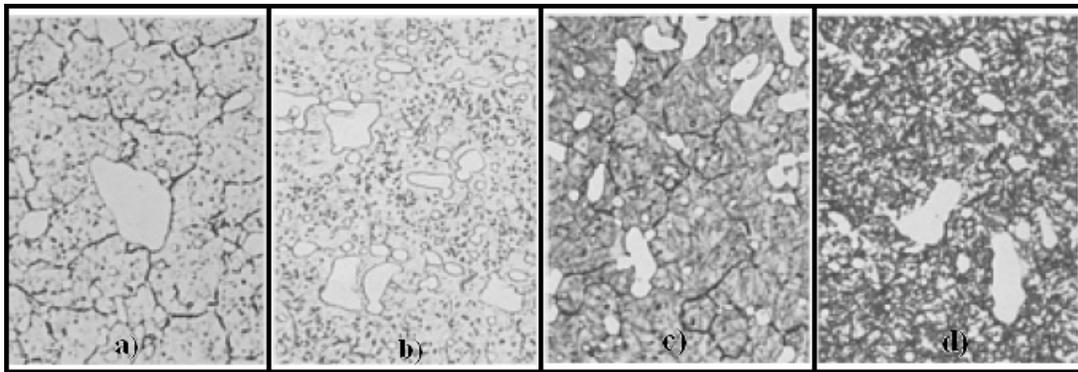
**Figura 2.2.** Aplicaciones de aceros para trabajado en frío(Burgos Salas 1996).

Los aceros para herramientas presentan determinadas características metalúrgicas que son necesarias a tener en cuenta a la hora de establecer un procedimiento para su reparación por soldadura. (Díaz Cedré, Ortiz Tamara 2003). Debido a que ellos generalmente contienen al menos 0,6 % de carbono, para proveer dureza martensítica, esto provoca que posean una dureza mínima de 60 HRc. El carbono en exceso de la composición eutectoide va a estar presente en los aceros como carburos insolubles en la matriz martensítica. Algunos tipos de aceros para herramientas contienen menos porcentaje de carbono para proveer tenacidad y resistencia al impacto. Por ejemplo, los de la serie P que son usados para moldes de inyección de plástico. (Colectivo de Autores CIS 2005).

El endurecimiento de los aceros para herramientas sigue las reglas generales que gobiernan este mecanismo, para los aceros aleados en general. El acero de bajo Carbono, endurecible en agua, obviamente alcanza menor dureza. Los aceros para herramientas aleados generalmente poseen suficientes elementos de aleación para permitir el temple a bajas velocidades, en aceite o aire. Elementos de aleación tales como el Cr, el Mo y W, los cuales se encuentran comúnmente en los aceros para herramientas, aumentan la temperatura eutectoide del acero, por la estabilización de la fase ferrítica. Adiciones de vanadio tienen un efecto similar. (Díaz Cedré, Ortiz Tamara 2003). Al mismo tiempo el contenido de carbono de la composición eutectoide disminuye con el incremento de la adición de algunas aleaciones. Esto tiene lugar debido a que tales elementos tienen mayor afinidad por el carbono que el hierro. Como resultado de esto, en los aceros para herramientas se requieren altas temperaturas para disolver los carburos en la Austenita.

A mayor contenido de carbono en la Austenita es más lenta su transformación a otras estructuras. La Austenita de alto porcentaje de carbono puede quedar retenida a temperatura ambiente, con altas velocidades de temple. El enfriamiento subsiguiente, por debajo de la temperatura ambiente, va

a transformar la Austenita retenida en Martensita. Al mismo tiempo el acero se expandirá y se producirán o incrementarán las tensiones residuales. En general, todos los elementos de aleación de los aceros para herramientas, excepto el cobalto disminuyen la temperatura de transformación Austenita-Martensita. En la figura 2.3, aparece la estructura metalográfica del acero D2, el cual es un caso típico de acero para herramienta de alta aleación. Aquí puede apreciarse que estos aceros presentan una estructura Martensítica, con carburos uniformemente distribuidos (Díaz Cedré, Ortiz Tamara 2003).



**Figura 2.3** Metalografía del acero D2, con diferentes técnicas de ataque: a) Atacada con Nital al 10% , revela los bordes de granos, carburos y Martensita ligera; b) Atacada con Picral y HCl al 4%; c) Teñida en caliente durante 5 minutos a 540 °C, después de atacar con 10% de Nital para producir mayor contraste y revelar, la Austenita retenida. d) Ataque con Superpicral, revela Austenita retenida como una fase blanca, igualmente revelado como fases blancas aparecen los carburos. (ASM Handbook Metallographic & Microestructure 1998).

## 2.5 Mecanismos de desgaste presentes durante la operación de conformado de metales

El desprendimiento de metal originado por el desgaste de una pieza puede variar notablemente, de muy intenso a insignificante. En cualquier caso, resulta de ello una pérdida de eficacia o un deterioro de la pieza. El problema de desgaste se presenta en todo tipo de sistemas industriales. Los casos más graves se presentan en determinadas industrias: automotriz, minas, ingenios

azucareros, siderurgia, petróleo, química y centrales eléctricas, por mencionar más que algunas.

La tecnología de los recubrimientos protectores y la soldadura de mantenimiento pueden contribuir a la solución de numerosos problemas de desgaste mediante la aplicación de aleaciones diseñadas específicamente para combatir cada uno de los mecanismos de deterioro superficial como la abrasión, impacto, corrosión, calor, etc.

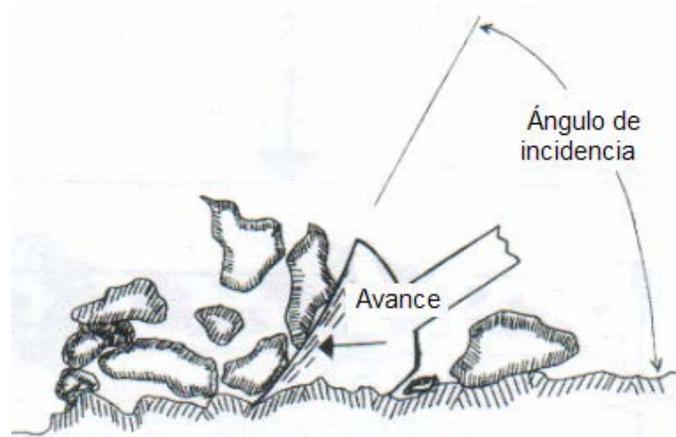
A objeto de poder seleccionar un sistema de aleación apropiado para cada caso, es de primordial importancia poder determinar con el mayor grado posible, el tipo de desgaste al cual se le atribuye el fenómeno de deterioro superficial. De lo anterior se desprende la necesidad de conocer y entender los principales mecanismos de desgaste con los cuales se enfrenta la industria en su operación. Tanto los ingenieros responsables del mantenimiento, como de la administración de planta deben tomar conciencia del alto costo que significa la pérdida de material en sus sistemas mecánicos y estar al tanto de los beneficios que brinda la tecnología de recubrimientos protectores y la soldadura de mantenimiento.

En el caso de herramientas de conformado no se presenta un mecanismo único, si no que se presenta de una manera combinada (John D. Streeter 2002). Debido a la naturaleza del proceso, el mecanismo combinado principal es el de impacto-abrasión y en un menor factor de contribución es el mecanismo de fricción, los cuales a continuación se explican:

### **2.5.1 Abrasión**

El término abrasión se emplea para describir la forma de desgaste superficial causado por el movimiento relativo de partículas duras sobre dicha superficie. El grado de abrasión depende de la naturaleza de las partículas, su

morfología, tamaño y dureza, además del grado de humedad de la superficie. Otros factores determinantes incluyen la presión ejercida por la partícula sobre la superficie, la concentración de partículas abrasivas, el ángulo de incidencia de éstas sobre la superficie y la velocidad relativa partículas-superficie. Ver figura 2.4

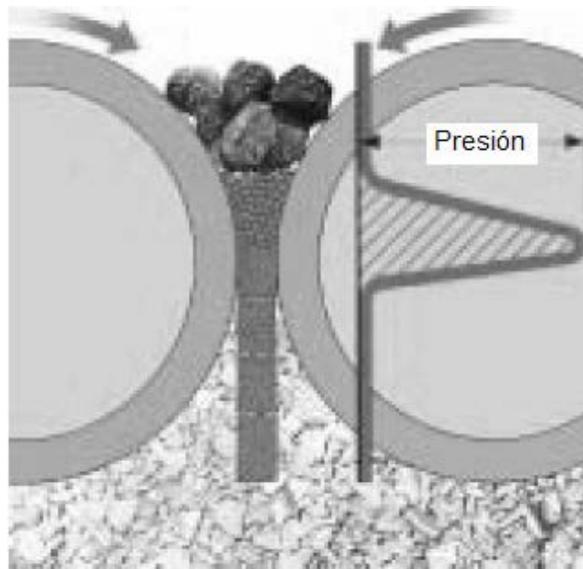


**Figura 2.4** Ángulo de incidencia de partículas abrasivas (John D. Streeter 2002)

Existen diferentes tipos de desgaste como lo son:

### **2.5.1.1 Abrasión bajo esfuerzo**

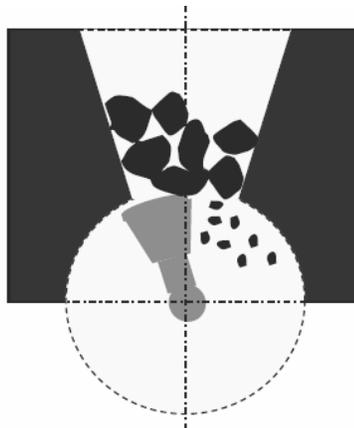
Partículas deslizándose libremente sobre la superficie a un ángulo de incidencia pequeño. Es frecuente encontrar este tipo de abrasión presente en superficies que se deslizan entre sí en medio de partículas que ejercen altas presiones sobre dichas superficies. Como se muestra en la figura 2.5.



**Figura2.5** Desgaste de abrasión bajo esfuerzo

### 2.5.1.2 Abrasión por desgarramiento

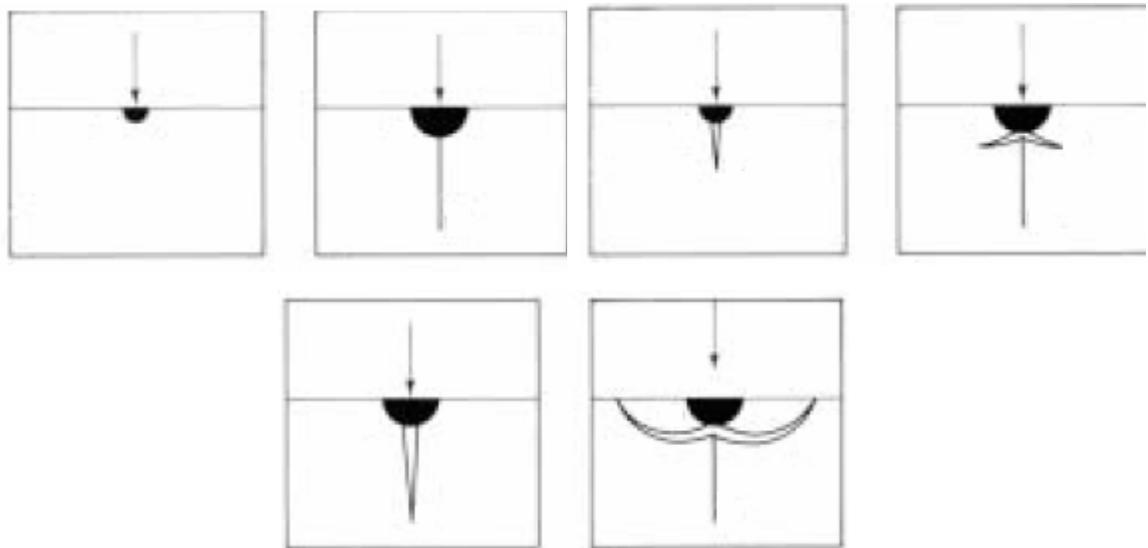
Este tipo de abrasión se caracteriza por la presencia de abrasivos de mayor tamaño, los que someten a la superficie a un grado de impacto y a altos esfuerzos de compresión. El ángulo de incidencia es generalmente mayor que en el caso del mecanismo de abrasión bajo esfuerzo. La remoción del material en abrasión por desgarramiento se debe a la deformación plástica, subsiguiente endurecimiento y desgarre de las partículas metálicas. Ver figura 2.6



**Figura 2.6** Desgaste de abrasión por desgarramiento.

### 2.5.2 Impacto

El desgaste por impacto, aún cuando no requiera mayor definición, es conveniente analizarlo desde un enfoque de transferencia de energía. Como se muestra la figura 2.7



**Figura 2.7** Desgaste de impacto

Considerando la figura anterior. En ella, una partícula (metálica o no metálica) choca contra una superficie. Dicha partícula posee un cierto grado de energía debido a la velocidad que lleva y a su masa, esta energía cinética viene expresada por:

$$E = (mv^2) / 2$$

Como se sabe, por la ley de conservación, la energía no se pierde, sólo se transforma. Para este caso, la energía acumulada se convierte, al impacto, en trabajo de deformación plástica o elástica, dependiendo de la característica de la superficie, y su habilidad de poder absorber dicha energía.

La habilidad de poder absorber la energía del impacto en un metal, viene en gran parte determinada por las características de tenacidad del mismo. La propiedad de tenacidad se puede definir como la capacidad de un metal de admitir el impacto de una carga aplicada rápidamente y depende de los valores de elongación, tensión de ruptura y ductilidad del material.

Si la superficie es frágil por el impacto puede fracturarse fácilmente, pero si es tenaz cederá por deformación elástica o plástica de forma que se evitará la fractura o al menos se retrasará. El material de impacto puede ser metálico o no metálico, por ejemplo las contra superficies de una matriz en una prensa.

Algunos de los efectos del impacto son los siguientes: agrietamiento por fatiga, compresión y deformación. Prácticamente todos los casos de impacto producen una combinación de estos efectos y provocan un debilitamiento de la micro estructura de la pieza de forma que otros mecanismos de desgaste pueden desarrollarse fácilmente como es el caso de los aceros herramienta alto Carbono y Cromo.

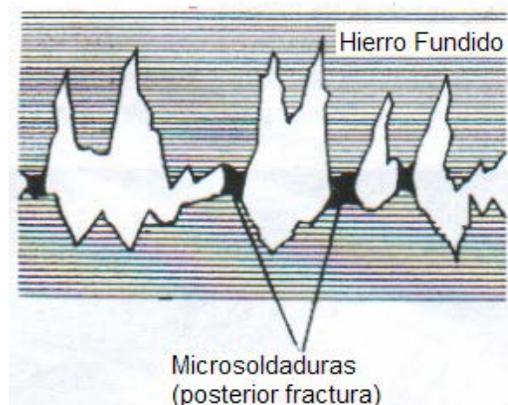
Numerosas aleaciones metálicas se endurecen mecánicamente cuando se someten repetidamente al impacto. El impacto genera fallos en la microestructura metálica (dislocaciones) como nudos, que se hacen mayores en número y se enredan con la repetición de los impactos. Estos nudos no dejan que el metal se deforme elástica o plásticamente como sucedería normalmente y por el contrario, confieren al metal un comportamiento más frágil. Es importante disponer de una matriz tenaz y una fina microestructura, de forma que las grietas no se propaguen a través del material y provoquen grandes fragmentos. El material de protección tiende a ser grueso y debe unirse metalúrgicamente al substrato (no proyectarse térmicamente) para permitir grandes deformaciones elásticas y plásticas con el impacto.

### 2.5.3 Fricción

Genera pérdida de material por rozamiento de una superficie metálica contra otra, está presente en forma amplia en todo proceso de estampado y constituye uno de los más activos agentes del desgaste de partes y piezas.

El examen microscópico de las superficies permite visualizar la microrugosidad real, que existe en piezas que en un examen macroscópico se ven pulidas. En efecto, las mismas son una sucesión de montes y valles de topografía aguda. El desplazamiento relativo de una superficie contra la otra produce el choque de aristas encontradas y se genera una deformación localizada, aumento de temperatura y ruptura de dichas aristas o bordes.

Se ha constatado además, el efecto de la soldadura, debido a elevadas temperaturas puntuales que se generan durante el proceso, entre las aristas de contacto. Dichas aristas, micro soldadas, dan lugar a remoción de metal en aquel que tenga menos dureza. Incluso, algunas de estas partículas desprendidas se ligan al metal más duro, dando lugar a la formación de una película fuertemente adherida. Por otro lado, se produce un efecto de abrasión de bajo y alto esfuerzo al existir partículas libres en el sistema, que tenderán a penetrar y/o rayar generalmente la superficie más blanda. Como se observa en la figura 2.8



**Figura 2.8** Mecanismo de desgaste de fricción (John D. Streeter 2004).

Aún cuando no existe una teoría general que explique el mecanismo de desgaste por fricción, este puede ser definido por una serie de variables que inciden en dicho fenómeno:

- Variables metalúrgicas:
  - Materiales en consideración.
  - Estructura de esos materiales y como se ven afectados por la temperatura.
  - Efecto de uno de los materiales difundiéndose en el otro.
  
- Variables físicas:
  - Temperaturas de fusión de los metales.
  - Dureza de los metales.
  - Conductividad térmica.
  - Capacidad calorífica.
  - Densidad.
  
- Variables mecánicas:
  - Modulo de elasticidad de cada uno de los metales.
  - Coeficiente de Poisson.
  - Presión de trabajo.
  
- Otras variables:
  - Rugosidad de las superficies.
  - Tratamiento superficial.
  - Velocidad relativa de las superficies en contacto.
  - Presencia o ausencia de lubricación

## 2.6 Soldadura aplicada para la recuperación de los aceros para herramientas.

En este tipo de soldadura, los aspectos desconocidos en cuanto a las características de la pieza a recuperar y las restricciones que impone el usuario son dos aspectos frecuentes a encontrarse (Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión 2001). El tratamiento térmico previo puede no tenerse definido, la presencia de contaminantes pueden afectar los resultados, los esfuerzos residuales propios de la soldadura también tienen influencia marcada en la calidad de la soldadura. Otro de los aspectos difíciles de contrarrestar en ocasiones es la accesibilidad de la zona dañada, ya que se trabaja con una pieza que ya está conformada, no es el caso de una producción nueva, que puede contemplar un ensamblaje por partes (Díaz Cedré, Ortiz Tamara 2003)

Generalmente, con el objetivo de disminuir costo y tiempo de reparación, estas herramientas se sueldan en estado de temple y revenido, lo cual es una limitante fundamental en la calidad de la soldadura. Teniendo en cuenta las características anteriores puede plantearse que estos aceros presentan problemas de soldabilidad. Como defecto principal en su soldadura está el agrietamiento, tanto en el metal base como en el depósito. Los defectos del tipo macro y microgrietas que surgen en la zona de unión soldada pueden dividirse en los siguientes grupos de acuerdo al intervalo de temperaturas en que se formen (Lozano G, Morgenfeld J 2001).

1- Macro o microgrietas en caliente, son aquellas que se forman durante el proceso de enfriamiento a elevadas temperaturas en el intervalo correspondiente desde la temperatura de *solidus* (*liquidus*) hasta 900-800°C.

2- Grietas en frío, o sea, grietas provocadas por el hidrógeno, retardadas, que se forman habitualmente luego de concluida la soldadura, a temperaturas inferiores a los 200-300°C.

3- Grietas de revenido, son las que se forman después de este tratamiento térmico de la unión.

4- Grietas laminares, las cuales, aunque pueden formarse tanto a elevadas temperaturas como en estado frío y tienen una morfología típica.

En el caso de la soldadura de aceros para herramientas, dadas sus características de composición química, estructura metalográfica y propiedades mecánicas, la mayor probabilidad de surgimiento de grietas es las de los tipos 1 y 2.

Por otra parte, la dureza máxima en la zona de influencia térmica es un índice que refleja la susceptibilidad química del metal base a la formación de grietas en frío. Donde  $HV \text{ máx.} = 90 + 1050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr...$  (Horo Sergio 1999).

Cuando este resultado es mayor de 350 HV se plantea que durante la soldadura existen probabilidades de formación, en la zona de influencia térmica de estructuras de elevada resistencia y fragilidad, las que constituyen elementos que favorecen la formación y propagación de grietas en frío o por hidrógeno. Los aceros para herramientas, como regla general, presentan una composición química tal que este índice HV máx. Alcanza un valor mayor de 350Hv, lo que implica que estos materiales son susceptibles a este tipo de defecto. (Lozano G, Morgenfeld J 2001).

En el caso del agrietamiento en caliente se plantea que para que el metal base no sea susceptible a la formación de este tipo de grietas (de licuación), en su composición química debe establecerse una relación Mn/S mayor de 50. En estos aceros el contenido de azufre se plantea que sea menor de 0,03. Excepto los del grupo O y A. ver tabla 2.1, que tienen contenidos de manganeso entre 0,7 y 2% (James F. 1999), el resto de estos aceros presentan una relación

Mn/S menor que 50, lo cual implica que van a poseer susceptibilidad química al agrietamiento en caliente.

Entre los procesos recomendados para la soldadura de aceros para herramienta se encuentran dos fundamentalmente, el de soldadura manual por arco con electrodo revestido por sus siglas en ingles (SMAW) y el de soldadura con electrodo no metálico y protección gaseosa por sus siglas en ingles (GTAW), y en los últimos años se ha venido desarrollando el proceso de High Velocity Oxi-Fuel por sus siglas en ingles (HVOF), para la recuperación por soldadura de ciertas propiedades mecánicas y e corrosión en casos específicos. En el caso del proceso SMAW y GTAW las ventajas para esta aplicación vienen dadas por su amplia gama de materiales de aporte disponible, capaz de responder a los requisitos dentro de la amplia gama de composición química que presentan estos aceros, además que brinda una protección gaseosa superior a la de otros procesos de soldadura (cuando se suelda alejado de corrientes de aire), además de que se logra un enfriamiento lento del baño de soldadura, aspecto fundamental para esta aplicación en aceros de elevada templabilidad.(Frolov V.V 1998).

## **2.7 Recomendaciones generales para la soldadura de aceros para herramientas**

Existen recomendaciones generales para la soldadura de aceros para herramientas con el proceso SMAW, las cuales se presentan a continuación (Cary Howard B 2004):

- Deben seleccionarse los menores diámetros de electrodos, adecuados para la aplicación específica que se realice.
  
- Es necesario que la superficie sea preparada por maquinado o esmerilado, las ranuras deben tener las caras redondeadas, con un ángulo de unión de al

menos 30° de forma tal que el ángulo del fondo sea mayor que el diámetro del electrodo. Deben eliminarse todos los bordes o esquinas agudas de la zona de soldadura.

- Debe soldarse siempre alejados de corrientes de aire, debido a que el herramental es templable al aire.

- Si va a repararse una grieta deben realizarse orificios de parada en sus extremos y toda la porción agrietada ser maquinada completamente, con transiciones suaves.

- Durante la construcción y reconstrucción de bordes puede ser ventajoso el uso de soportes de cobre o barras de grafito, que contengan el metal fundido del baño de soldadura.

- Es de suma importancia la absoluta limpieza del área de la pieza que está siendo reparada, así como eliminar toda la humedad de los electrodos.

- Para las primeras pasadas se recomienda el uso de planchas para el encendido del arco.

- Es necesario utilizar el menor calor aportado posible e irlo disminuyendo para pasadas sucesivas.

- Si es posible, la pieza debe ser posicionada con una ligera inclinación ascendente, con vistas a mejorar la penetración del depósito.

- Usar una técnica de "Back step" o "skip weld", especialmente cuando reparan bordes de corte en forma de anillo y matrices de extrusión. Esto permitirá una distribución de calor homogénea en la pieza soldada.

- Siempre debe ejecutarse precalentamiento a la temperatura adecuada, ya sea en hornos o en cajas aisladas, especialmente construidas con ese fin.
- Se deben depositar cordones estrechos, con un ancho igual a un diámetro o diámetro y medio del electrodo que se utiliza.
- Eliminar la escoria entre pasadas mediante cepillado.
- Se recomienda un martillado ligero al depósito en caliente (al rojo) para aliviar tensiones.
- Nunca permitir que la pieza se enfríe hasta temperatura ambiente luego de la soldadura y antes del revenido ó alivio de tensiones.
- En cuanto a la selección del metal de aporte para la soldadura de los aceros para herramientas, existen consideraciones esenciales que deben ser seguidas en función de obtener soldaduras de calidad (Burgos Salas 1996).
- Lo primero es tener una certeza acerca del metal base que va a ser soldado, es de su composición química, condición de tratamiento térmico (recocido o endurecido) y los requerimientos de servicio del área a ser soldada.
- Cuando la herramienta está en condición de recocido debe utilizarse un metal de aporte de composición química similar a la del metal base, con vistas a que responda al tratamiento térmico que se le realizará posteriormente a la pieza.
- Cuando la herramienta está endurecida (temple más revenido) la selección del metal de aporte presenta mayor dificultad, sin embargo existe un amplio rango de materiales posibles a seleccionar. En este caso se recomienda seleccionar un material que al enfriarse alcance las propiedades mecánicas necesarias en la zona de la herramienta que está siendo soldada. En muchos casos este

material de aporte tendrá una composición química completamente diferente a la del metal base. No se recomienda repetir, luego de la soldadura, el tratamiento de endurecimiento, debido al riesgo de grietas. (Lozano G, Morgenfeld J 2001).

- Si el depósito va a ser realizado en un área de la herramienta que no es de trabajo, el aspecto fundamental a lograr es la ausencia de grietas en la soldadura, para lo cual pueden seleccionarse aceros de baja aleación o inoxidable.

- Si va a soldarse en una zona de trabajo con metal de aporte de acero para herramientas deben depositarse como máximo tres capas esto debido a la distorsión del material. En caso de que se requiera un depósito de mayor profundidad debe utilizarse la técnica de enmantequillado, realizando las pasadas intermedias con electrodos de aceros de alta ductilidad, para posteriormente soldar las capas finales con metal de aporte de acero para herramientas.

- Para prevenir la formación de grietas bajo el cordón es importante precalentar, garantizar el enfriamiento lento y un bajo calor aportado al depósito.

- Finalmente realizar un alivio de tensiones inmediatamente.

### **2.7.1 Metales de aporte**

Son tres los tipos fundamentales de metales de aporte a seleccionar durante la soldadura de aceros para herramientas. El primero tiene como función proveer depósitos duros, luego de la soldadura o del alivio de tensiones. Estos generalmente se incluyen como marcas propias de las empresas productoras y no cumplen con clasificaciones estándares (Lincon Electric company 2006).

Estos metales de aporte corresponden con los principales grupos de aceros para herramientas (endurecibles en agua, aceite o aire, de trabajo en caliente o de alta velocidad) y deben seleccionarse en función de igualar las propiedades del metal base.

El segundo grupo, en el cual se incluyen los metales de aporte de aceros de bajo carbono y baja aleación, no van a proveer de dureza a la zona soldada, si no la de ductilidad y tenacidad a los depósitos.

El tercer tipo comprende metales no endurecibles, tales como níquel y aleaciones de este, aceros inoxidable Austeníticos y aleaciones de níquel-cobre. Ellos son adecuados debido a su ductilidad, lo cual evita la formación de grietas y pueden ser utilizados como capa intermedia para posteriores operaciones de acabado superficial.

Existen recomendaciones específicas para la selección del metal de aporte con vistas a la reparación de un área de trabajo, para determinados grupos de aceros (Cary Howard 2004), como puede verse en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2:** Recomendaciones de composición química del metal de aporte para la soldadura, en zonas de trabajo de diferentes aceros para herramienta en estado endurecido para soldar con GTAW y SMAW. (Diaz Cedré, Ortiz Tamara 2003).

<b>Tipo de acero grado herramienta</b>	<b>Composición química recomendada para el metal de aporte</b>
W1, W2	0,95%C, 0,20%Si, 0,30%Mn, 0,20%V
S1, S5, S7, H11, H12, H13	0,33%C, 1,00%Si, 0,40%Mn, 5,00%Cr, 1,35%Mo, 1,25%W.
O1, O6	1,92%C, 0,30%Si, 1,28%Mn, 0,50%Cr, 0,50%W
A2, A4, D2	0,95%C, 0,30%Si, 0,40%Mn, 5,25%Cr, 1,10%Mo, 0,25%V

## 2.8 Pre calentamiento

Otro factor de vital importancia dentro de la tecnología de soldadura de herramientas de conformación es el pre calentamiento. Este es un paso necesario con vista a disminuir los gradientes de temperatura y las tensiones residuales de la zona de la soldadura y minimizar de esta forma el agrietamiento.

Otro aspecto a controlar en esta aplicación es la decoloración del metal base. Este es un fenómeno que ocurre en los aceros para herramientas cuando la temperatura de pre calentamiento sobrepasa determinados niveles, en dependencia del tipo de material; esta sólo puede evitarse cuando se suelda en cámara de argón. (Steve Thompson 1999).

En la literatura (Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión 2001), aparecen reportadas diversas recomendaciones acerca de la temperatura de pre calentamiento necesaria para la soldadura de los aceros para herramientas, las cuales en muchos casos varían de una referencia a otra. En la tabla 2.3 se presentan las temperaturas pre calentamiento normadas para evitar el agrietamiento en la soldadura de los diferentes aceros para herramientas y los valores máximos a alcanzar para los casos en que no se admita la decoloración.

**Tabla 2.3** Pre calentamiento para la soldadura de aceros grado herramienta. (Asociación española de Soldadura y Tecnologías de Unión 2001).

<b>Material</b>	<b>Temperaturas normales (°C)</b>	<b>Sin decoloración (°C)</b>	<b>Enfriamiento</b>
A2	250-350	100-140 Máx.	Lento
D2	250-350	140-180 Máx.	Lento
D3	350-450	No recomendado	Lento
H13	150-250	110-150 Máx.	Aire
L6	200-250	110-150 Máx.	Aire
O1	250-350	100-140 Máx.	Lento
P20	150-200	100-140 Máx.	Aire
S1	200-250	110-150 Máx.	Aire

Los aceros A2, D2 y O1 son muy sensibles al agrietamiento y deben tomarse extremas precauciones en la soldadura si se usan temperaturas de pre calentamiento menores a estas recomendadas. El acero D3 es extremadamente sensible a agrietamiento aún cuando se usa la temperatura de pre calentamiento recomendada.

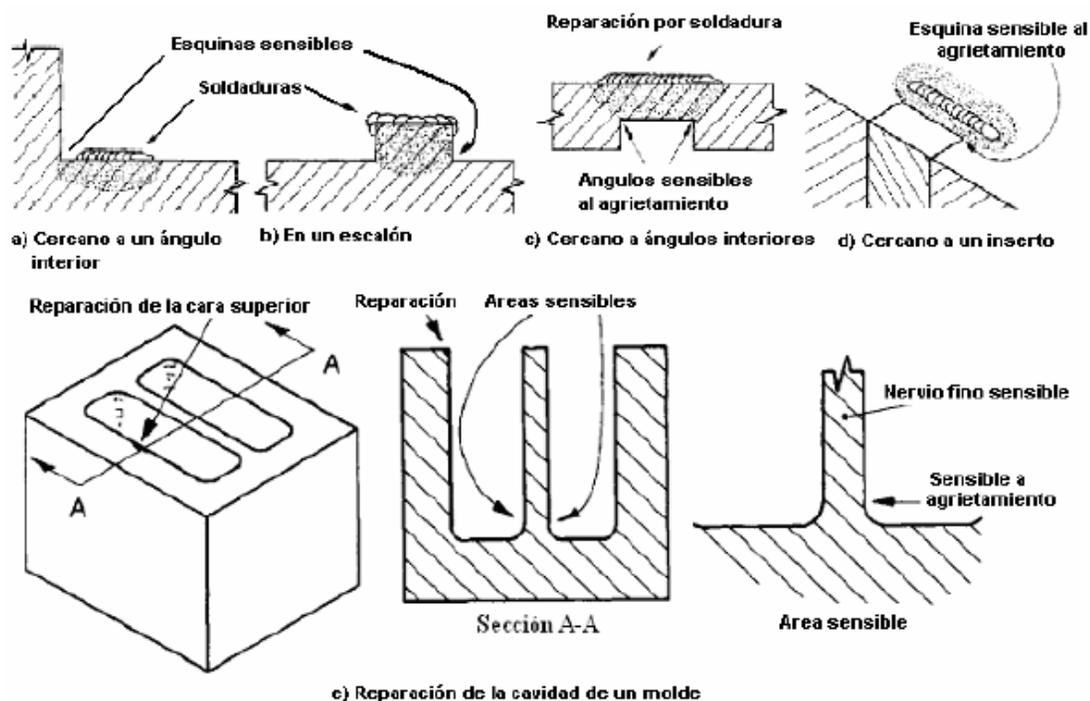
Cuando se recomienda un rango de temperatura, la menor debe ser usada para secciones finas y la mayor para secciones gruesas o herramientas voluminosas. La temperatura de pre calentamiento mínima debe ser siempre mantenida como temperatura entre pasos durante la soldadura. (Lozano G, Morgenfeld J 2001).

En la tabla 2.3 se recomiendan dos tipos de enfriamiento, al aire y lento. El enfriamiento al aire se realiza dejando enfriar naturalmente la pieza después de la soldadura, lejos de corrientes de aire. En el caso del enfriamiento lento, se debe realizar el enterramiento de la pieza en arena.

De forma general se plantea que las herramientas que tienen 60 HRC o más deben tener un precalentamiento mínimo de 350°C. Los aceros rápidos, templados y revenidos deben precalentarse como mínimo a 400°C y realizar el revenido inmediatamente después de la soldadura por una hora a 540 - 550°C, con enfriamiento lento.

Con respecto al calentamiento en el horno se plantea que independientemente del tipo de horno que se utilice, es recomendable ir elevando la temperatura a la pieza de forma gradual (Cugat Mario 1999). Debe evitarse introducir la herramienta dentro del horno a temperaturas mayores de 120°C, especialmente si la herramienta contiene variedad de espesores, los cuales van a calentarse a diferentes velocidades, incrementando de esta forma la posibilidad de agrietamiento y decoloración en áreas sensibles.

Aún con el precalentamiento adecuado se pueden presentar problemas debido a la existencia de áreas de la herramienta más sensibles al agrietamiento que otras. Las principales áreas con problemas son las cercanas a las esquinas internas. (Ver figura 2.9). Los bordes externos pueden ser problemáticos, especialmente si se ha decidido no usar precalentamiento completo.



**Figura 2.9** Áreas sensibles al agrietamiento: a) Cercano a un ángulo interior, b) En un escalón, c) Cercano a ángulos interiores, d) Cercano a un inserto y e) Reparación de la cavidad en un molde. (Horo Sergio R. 1999).

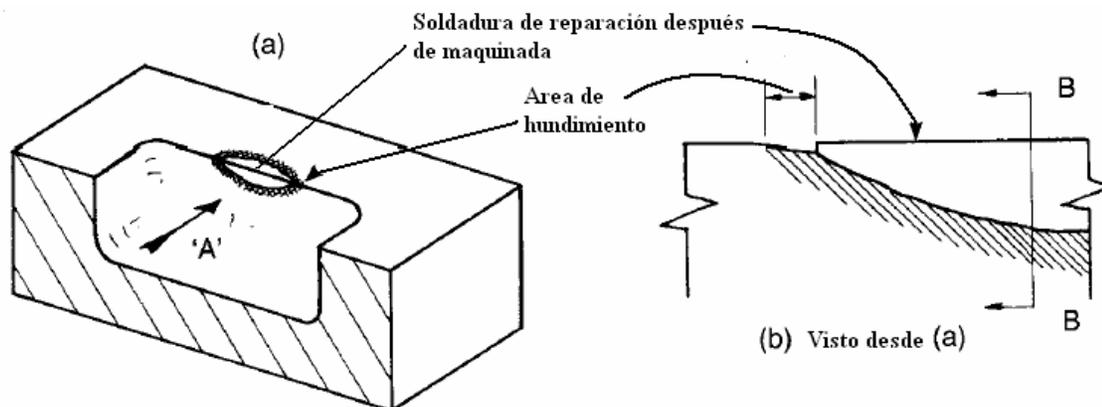
En estado de recocido la mejor práctica es permitir un enfriamiento de la unión soldada hasta aproximadamente  $90^{\circ}\text{C}$  y entonces calentarlo dentro de un rango de temperatura apropiado de  $250^{\circ}\text{C}$  a  $350^{\circ}\text{C}$ . Cuando se trabaje con metal base endurecido no debe exceder la temperatura original de revenido. Una práctica común es calentar  $25\text{-}50^{\circ}\text{C}$  por debajo de la temperatura original de revenido.

## 2.9 Técnicas fundamentales para la reparación de herramientas por medio de soldadura.

En la soldadura de reparación de herramientas de conformación es común la aparición de defectos, los cuales pueden ser contrarrestados o disminuidos si se aplican las técnicas antes mencionadas. Entre estos defectos

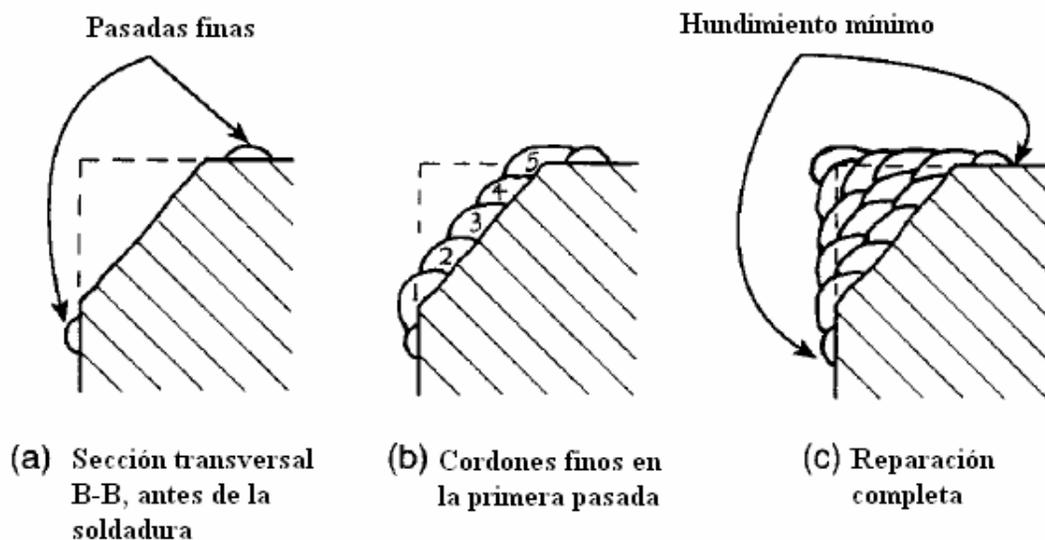
se encuentran principalmente el hundimiento de material y la socavadura. (Díaz Cedré, Ortiz Tamara 2003).

El hundimiento de material en pequeñas áreas alrededor del depósito es inevitable con los procesos de soldadura estándares, tales como el SMAW o GTAW, pero este defecto puede minimizarse usando la técnica de HVOF (J.C Tan, L Looney 1999). Este es un problema principal en la reparación de herramientas de moldeo de plásticos, especialmente si la zona a ser soldada o rellenada está por debajo de su tolerancia original y no puede eliminarse más material base. (Ver figura 2.10).



**Figura 2.10.-** Forma del hundimiento: a) Soldadura de reparación después de maquinado y b) Vista Transversal (Horo Sergio R. 1999).

Para minimizar el área de hundimiento de material durante el proceso de soldadura GTAW, se necesita reducir el amperaje para depositar una o dos pasadas finas en el área de hundimiento, antes de comenzar la soldadura. (Ver figura 2.11) de esta forma el hundimiento se minimiza a 0.05 – 0.0075mm.

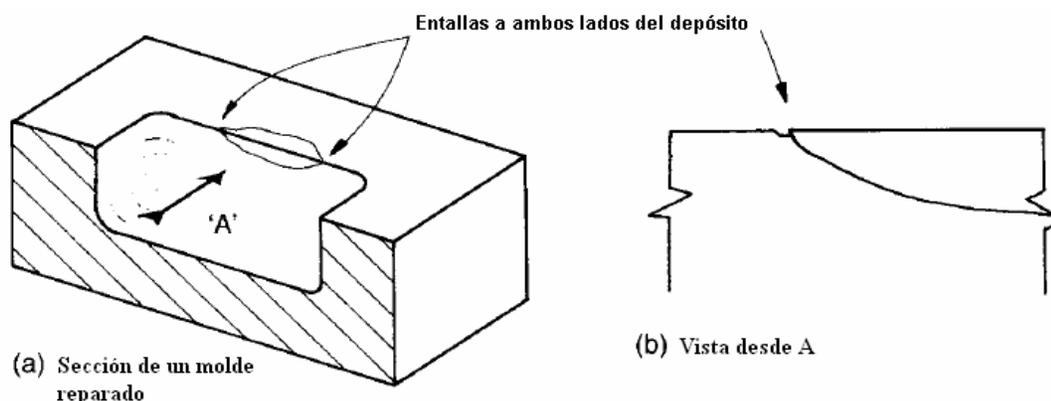


**Figura 2.11** Técnica para contrarrestar el hundimiento: a) Sección transversal antes de la soldadura, b) Cordones finos en la primera pasada y c) Reparación completa. (Horo Sergio R. 1999).

La formación de socavadura a ambos lados del cordón es un problema que puede ser aún más severo que el hundimiento de material, ya que es muy difícil de controlar y además que ningún código la permite. Ver figura 2.12

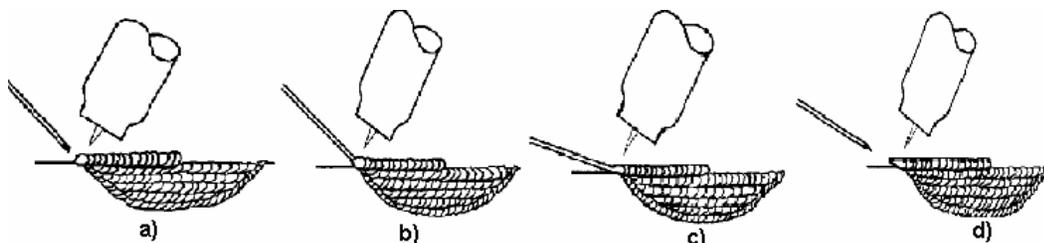
Este defecto puede ser minimizado utilizando la técnica de arrastre (tug off), la cual se explica a continuación. Esta se aplica mayormente cuando se suelda con el proceso de soldadura manual por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa. Antes de comenzar la pasada final del depósito, se debe limpiar cuidadosamente el área con un cepillo de alambre. Para luego partir en la realización del depósito desde el centro hasta el borde exterior del mismo, cubriendo además la zona de hundimiento de material. La varilla de aporte se debe direccionar hacia atrás, dentro del charco fundido y reducir el amperaje (esta técnica se facilita con el uso de un pedal de pie). Es necesario mantener la varilla de aporte en el charco fundido hasta que esta se haga plástica (como el vidrio líquido), arrastrar la varilla a través del borde no tocando, extinguir el arco y arrastrar la varilla mientras este en estado plástico. Luego girar el ángulo

de la varilla y colocarla en el centro y hacer la misma operación hacia el borde contrario, para completar la otra mitad del depósito.



**Figura 2.12** Representación de socavaduras a ambos lados de un depósito: a) Sección de moldes separados, b) Vista transversal (Horo Sergio R. 1999).

La técnica de arrastre (tug off) es muy complicada de realizar, esta solo podrá ser hecha por un soldador experimentado, pero a pesar de esto es práctica común en la reparación de las zonas de trabajo en herramientas de conformación. Ver figura 2.13.



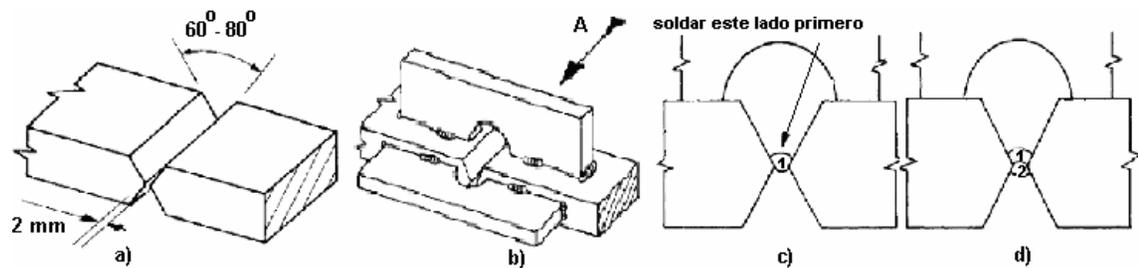
**Figura 2.13-** Esquema de la técnica de arrastre para contrarrestar la socavadura. a) Se deposita con sentido desde el centro hasta el borde de la zona de hundimiento b) se sitúa la varilla contra el depósito y se reduce el amperaje c) mientras el depósito está en estado plástico se arrastra la varilla hacia el borde, d) se extingue el arco y se desprende la varilla cuando aún esté en estado plástico. (Burgos Salas 1996).

En el caso de la reparación de herramientas partidas, la distorsión es un problema común, el cual es muy difícil de corregir luego de la soldadura, de forma que es necesario prevenir este defecto. Una de las vías fundamentales

utilizadas con este fin es el uso de restricciones. En la figura 2.14 aparece una herramienta con una preparación para una soldadura, mediante esmerilado del doble bisel en cada cara, con una holgura de 2mm. Esta herramienta se restringe como se muestra en dicha figura.

La primera pasada será por la cara restringida para luego resanar la misma por la cara posterior, de forma que se elimine todo el metal oxidado, dejando el metal limpio para completar de esta forma la pasada de raíz.

Para el llenado posterior de la preparación de bordes se recomienda realizar cordones con un orden tal que las capas del depósito sean aplicadas de forma alterna, con vistas a minimizar la distorsión.



**Figura 2.14** a) sección de una herramienta a la que se le realizará una reparación mediante un depósito a tope de penetración completa b) sección completamente restringida c) vista desde A, penetración completa de la primera pasada. Siempre se debe soldar primero por el lado de la restricción d) resanar la primera pasada y completar las pasadas de raíz (Burgos Salas 1996).

## 2.10 Tratamiento térmico aplicado en aceros grado herramienta

El tratamiento térmico de los aceros herramienta presenta muchas particularidades, por una serie de factores, y no sólo factores metalúrgicos, puede considerarse muy diferente del tratamiento térmico de aceros al carbono o baja aleación, por ejemplo, aplicados a piezas seriadas. En primer lugar, por la alta dependencia de las propiedades finales del material al tratamiento térmico aplicado. Las condiciones de temperatura, tiempo y valores de calentamiento y enfriamiento, los equipos utilizados, en fin todo el procedimiento pueden estar y, en la mayoría de los casos, estará fuertemente relacionado al desempeño final de la herramienta. En segundo lugar, por el alto valor agregado de las piezas a tratarse; en este caso, moldes y matrices, en los que los costos de mecanizado y del propio acero ya están incluidos. En tercer lugar, por ser normalmente una de las etapas finales del proceso. Así, en el caso de ocurrir problemas serios, es muy difícil reponer la herramienta tratada en el plazo pactado. En cuarto lugar, porque los moldes y matrices no se tratan de herramientas estandarizadas. Como consecuencia, los tiempos de calentamiento, la geometría y los concentradores de tensión relacionados a ella, varían constantemente, y en quinto lugar, por la estrecha franja de temperatura, tanto de Austenitización y revenido, como por la variación de esta franja entre los diversos tipos de aceros herramienta aplicados (R. Ebner, H Leitner 1999).

Todas esas especificaciones sobre el tratamiento térmico de los aceros herramienta, pueden llevar a problemas/fallas del proceso que, en consecuencia, ocasionarían un bajo rendimiento de la herramienta. En términos de fallas, es interesante dividir las en dos subgrupos (L.P. Borrego 2009).

El primer grupo sería el de las fallas identificadas en el propio proceso, como pequeñas rayas o catastróficas, distorsiones, problemas superficiales (como descarbonatación y oxidación) y otras fallas visiblemente observadas. A pesar de graves, en general no comprometen la vida útil de la herramienta, o

por lo menos, no generan resultados inesperados durante su utilización, porque son identificadas antes que la misma entre en operación.

La segunda posibilidad de problemas derivados del tratamiento térmico, que será objeto de estudio en el presente trabajo, se refiere a las condiciones de temperatura, tiempo y valores de enfriamiento empleados. El control de calidad del tratamiento térmico, en la gran mayoría de los casos, sólo se realiza por medidas de dureza en la superficie de la herramienta. Esto ocurre porque normalmente se trata de piezas únicas y de alto valor, no siendo posible el destruirlas, analizarlas microestructuralmente y en sus propiedades obtenidas. Así, una vez que la dureza sea la correcta, difícilmente podrán identificarse posibles desvíos de tratamiento térmico antes de que la herramienta se utilice y los mismos apenas se observarán si se percibe una menor vida útil de la herramienta, y si la causa de la falla pudiera ser definida con precisión (L.P. Borrego 2009).

### **2.10.1 Generalidades**

Los tratamientos térmicos más usuales son el templado y el revenido, ya que propician dureza y propiedades mecánicas adecuadas a la mayoría de las aplicaciones.

El control de calidad del tratamiento térmico, en la gran mayoría de los casos, sólo se realiza por medidas de dureza en la superficie de la herramienta. Esto ocurre porque normalmente se trata de piezas únicas y de alto valor, no siendo posible el destruirlas, analizarlas microestructuralmente y en sus propiedades obtenidas. Así, una vez que la dureza sea la correcta, difícilmente podrán identificarse posibles desvíos de tratamiento térmico antes de que la herramienta se utilice. Y los mismos apenas se observarán si se percibe una menor vida útil de la herramienta, y si la causa de la falla pudiera ser definida con precisión (L.P. Borrego 2009).

### **2.10.2 Temple y revenido en los aceros herramienta**

El templeado es una operación mediante la cual los aceros elevan su dureza; éste consiste en calentar el material a temperatura de la región de Austenitización, para posteriormente enfriar el acero en algún medio que permita el temple (agua, aceite, salmuera, sales o aire), por otro lado el revenido produce una estructura óptima en el material, mediante ciclos de calentamiento del material (Cugat Mario 1999).

Las temperaturas usadas para los tratamientos térmicos de aceros grado herramientas están dentro del rango más amplio para cualquier producto metalúrgico, ya que pueden variar desde temperaturas bajo cero las cuales se usan en tratamientos muy especiales, hasta temperaturas de 1315°C; lo cual indica que el temple aplicado a aceros para herramienta está lleno de particularidades dependiendo de la composición del material. (ASM Handbook Heat Treating 1998).

### **2.10.3 Austenitización**

La base de los tratamientos térmicos para todos los aceros grado herramienta radica en el hecho que cuando son calentados, ocurre un cambio estructural. La mezcla de Hierro y Carbono que existen en el acero a bajas temperaturas se transforma a Austenita cuando se supera la temperatura crítica del material durante el calentamiento (ASM Handbook Heat Treating 1998). La Austenitización es la operación de calentamiento más crítica ejecutada en los aceros grado herramienta, esto debido al poco rango de temperatura en el cual se puede controlar la Austenita. Las excesivas temperaturas de Austenitización ó el tiempo prolongado de calentamiento en ocasiones pueden resultar en una distorsión excesiva, crecimiento anormal del grano, pérdida de la ductilidad y baja resistencia.

Esta premisa se cumple principalmente en los aceros rápidos (de la serie AISI/SAE T y M), los cuales con frecuencia son Austenizados a temperaturas cercanas al punto de fusión del material. Sin embargo, calentar el material por debajo de su temperatura crítica se traduce en una baja dureza y baja resistencia al uso del material. Al momento de enfriar la pieza, de modo de templarla, si el centro de la herramienta es más frío que el exterior puede ocurrir una fractura en las esquinas, particularmente con los aceros endurecidos en agua (Griňak L. 1994). Previo al tratamiento térmico, todas las superficies de material deben estar libres de descarburización.

La Austenitización es el proceso térmico en el cual se da la homogenización final del elemento aleado entre la matriz Austenítica, la cual se transformara a Martensita y el Carbono retenido. Esto está en función de la composición química, las fracciones de volumen y la dispersión del carburo retenido. Estos carburos no solo contribuyen a la resistencia al uso del material, si no que controlan el tamaño de grano Austenítico. De esta manera, si la Austenitización es ejecutada a muy altas temperaturas, se puede producir crecimiento en el grano el cual es indeseable, el Carbono aleado incrementa su grosor o se disuelve en la Austenita.

Los elementos aleados y el Carbono retenido se encuentran en solución en la Austenita, generando un mecanismo importante por el cual la composición química de la Austenita se estabiliza. El contenido de Austenita retenida y el potencial secundario de endurecimiento de acero grado herramienta son factores importantes a considerar a la hora de hacer el tratamiento térmico (ASM Handbook Heat Treating 1998).

#### **2.10.4 Enfriamiento**

El enfriamiento del material cuando este se encuentra a temperatura de Austenitización, se puede realizar en agua, salmuera, aceite, sal, gas inerte ó aire, todo esto dependiendo de la composición y la selección transversal ó grosor de la pieza. Es importante precisar que el medio de enfriamiento, debe enfriar la pieza lo suficientemente rápido de manera que se obtenga una dureza total. Sin embargo es poco común usar un medio de enfriamiento con una capacidad que exceda los requerimientos, porque puede producirse una fractura ó distorsión en la pieza.

Los aceros grado herramienta deben de ser enfriados durante un lapso de tiempo suficiente que permita que la descomposición de la Austenita inicie; el tiempo de enfriamiento juega un papel muy importante ya que minimiza la distorsión de la pieza sin afectar la dureza. (Doyen P.S., Skrabec 1997).

#### **2.10.5 Revenido**

Este tratamiento modifica las propiedades de los aceros templados para producir una combinación de resistencia y dureza más deseable. La microestructura de los aceros herramienta templados, es una mezcla heterogénea de Austenita retenida, martensita no revenida y carburos.

Por lo regular, más de un ciclo de revenido es necesario para producir una estructura atómica óptima; normalmente es deseable transformar toda la Austenita retenida, para así asegurar la dureza completa, mejorar la resistencia u minimizar la distorsión durante el servicio de la pieza.

Los cambios que ocurren en la microestructura de los aceros endurecidos durante este proceso dependen en gran parte del tiempo y la

temperatura. El tiempo no debe de ser menor a una hora para cualquier proceso (ASM Handbook Heat Treating 1998).

Es así que, en el revenido el tiempo debe de ser el suficiente para que la temperatura sea distribuida uniformemente, esto es especialmente cierto para temperaturas bajas de revenido y para herramientas que cuentan con secciones grandes. Un revenido adecuado depende en determinar la correcta temperatura así como el volumen y el espacio para así asegurar un calentamiento homogéneo.

### **2.11 Proceso de templado para aceros herramienta para trabajado en frío. (AISI A2 y AISI D2)**

El acero A2 es un material empleado para aplicaciones en herramientas donde la dureza es más importante que la resistencia al uso. La solución es que los elementos aleados como Cromo, Molibdeno, y Vanadio permiten que este acero pueda llegar a ser altamente duro; en cambio el AISI D2 es un material que brinda excelente resistencia al uso, esto como resultado de su alto contenido de Cromo (12%), así como de carbono (1.5%) (Doyen P.S., Skrabec 1997).

En lo referente al tratamiento térmico, este tipo de aceros usualmente son precalentados antes de que estos sean Austenizados; este proceso ayuda a reducir la distorsión en las piezas endurecidas, mediante la reducción de cambios dimensionales no uniformes que se presentan durante la Austenitización.

Las temperaturas de precalentamiento para estos aceros llegan a oscilar de 790°C a 815°C y el tiempo que estos deben de permanecer en el horno es usualmente una hora por cada 25 milímetros de la máxima sección transversal de la pieza. Los aceros de esta categoría pueden ser Austenizados en baño de

sales o en hornos que se usan una atmósfera gaseosa; sin embargo es recomendable usar un horno de alto vacío ya que al ser estos aceros endurecidos al aire, este tipo de equipo permite tasas de enfriamiento más lentas. Es importante tener en cuenta que estos materiales deben de permanecer a temperatura de Austenitización el suficiente tiempo (20 minutos para piezas pequeñas a 456 minutos en herramientas grandes) de modo que se obtenga la solución requerida de carburos para obtener así la máxima dureza; sin embargo se debe tener cuidado con la temperatura, ya que un incremento pequeño en esta ocasionará Austenita retenida en la pieza. (ASM Handbook Heat Treating 1998).

El medio a través del cual estos aceros obtienen su máxima dureza es el aire, el cual se puede proveer a la pieza mediante corrientes de aire, ventiladores o por descargas de aire desde una línea de alta presión. En la tabla 2.4 se presentan los parámetros recomendables a seguir para el tratamiento térmico de estos aceros.

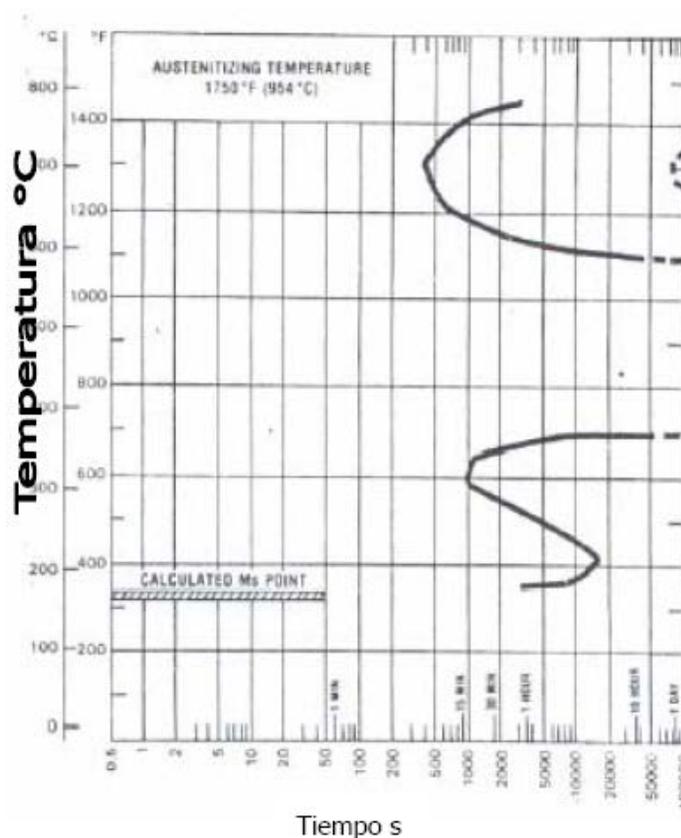
**Tabla 2.4** Parámetros recomendables para el temple del acero A2 y D2 (Cugat Mario 1999).

Temperatura °C			Dureza al tratamiento térmico de temple		
Acero	Pre calentamiento	Austenitización	Tiempo de Austenitización (min).	Temple al agua	HRC
A2	790	925-980	20	Aire	62-65 (b)
D2	815	979-1010	15	Aire	64

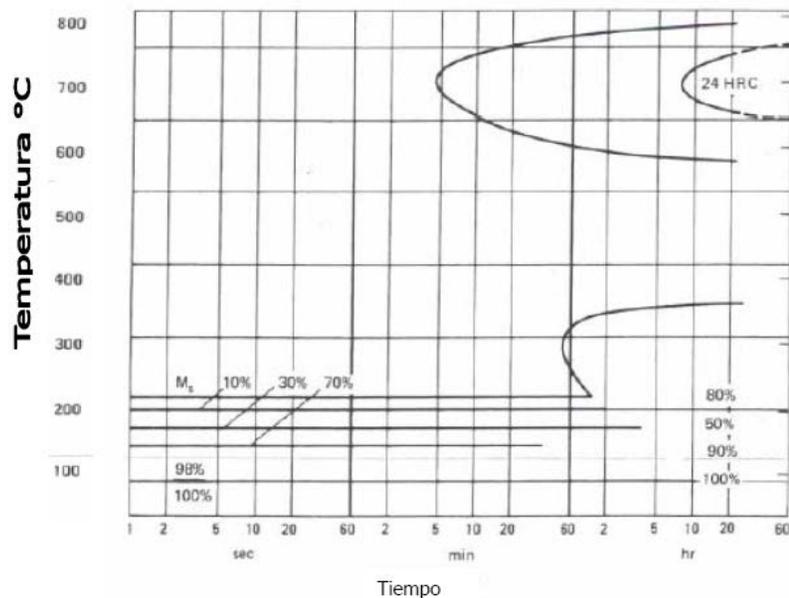
(b) la dureza puede variar con respecto a la temperatura de Austenitización.

La figura 2.15 se encuentra el diagrama (IT) para el acero D2, Austenizado a 954°C, en la figura 2.16 se puede observar el diagrama de transformación de la fase para el acero AISI D2, en la cual se aprecia que la Martensita se comienza a formar alrededor de los 220°C.

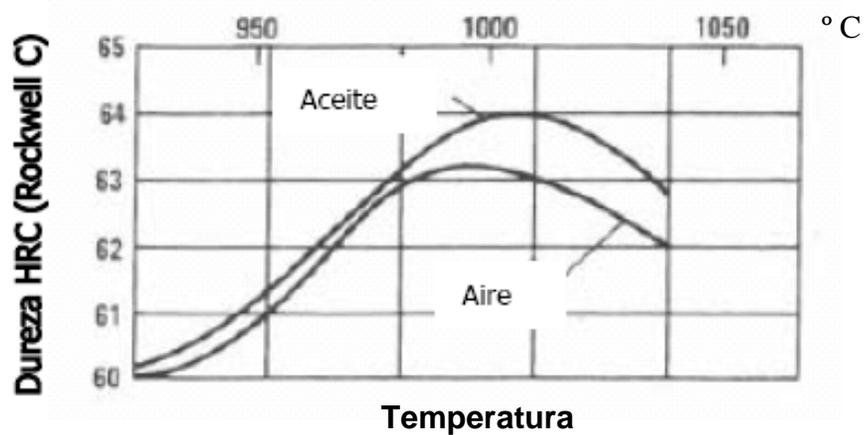
En la figura 2.17 se observa la gráfica de dureza contra temperatura de Austenitización; en la figura 2.18 es posible ver los estragos que puede ocasionar el elevar la temperatura de Austenitización en el AISI D2, con respecto al porcentaje de Austenita Retenida.



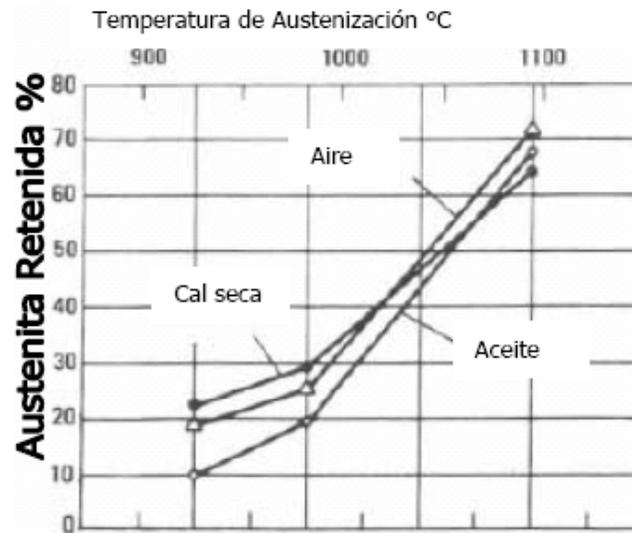
**Figura 2.15** Diagrama isotérmico del acero AISI D2 Austenizado a 954°C (ASM Handbook Heat Treating 1998).



**Figura 2.16** Diagrama isotérmico del acero AISI D2 Austenizado a 980°C (ASM Handbook Heat Treating 1998).



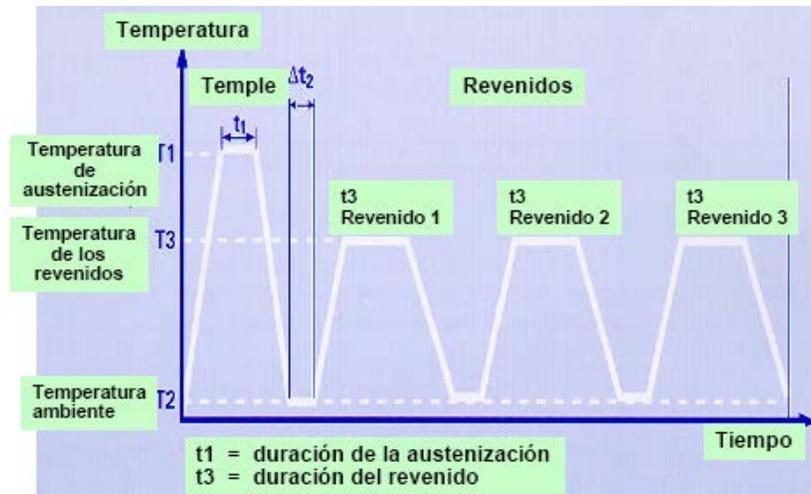
**Figura 2.17** Dureza contra temperatura de Austenitización en un acero D2 que contiene 1.5%C (ASM Handbook Heat Treating 1998).



**Figura 2.18.** Austenita retenida en acero D2 contra temperatura de Austenitización 1.60 %C, 0.33 %Mn, 0.32 % Si, 11.95 %Cr, 0.25 %V, 0.79 %Mo, 0.010 %S, 0.015 %P (ASM Handbook Heat Treating 1998).

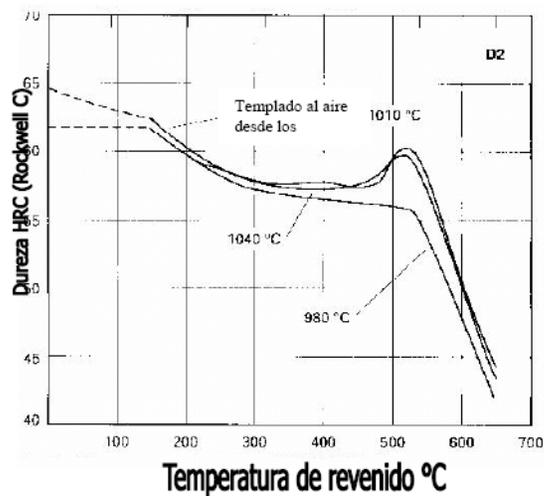
El revenido en estos aceros inicia en el horno alcanza de 55° a 65°C sin embargo estos aceros retienen Austenita a este rango de temperatura. Para maximizar la transformación de Austenita a Martensita, un enfriamiento a temperatura ambiente o bajo cero es aplicado algunas veces, aunque este último incrementa la probabilidad de que la pieza se fracture ó agriete durante el ciclo de enfriamiento (Steven Thompson 1999).

De modo que la práctica más usual es la de comenzar el revenido cuando las piezas han alcanzado de 50° a 60°C para después realizar un doble o triple revenido. El múltiple revenido reduce la cantidad de Austenita retenida en estos aceros. La temperatura mínima requerida para los aceros D2 es de 205°C; temperaturas mayores a 550°C son frecuentemente usadas para aplicaciones especiales. Ver figura 2.19



**Figura 2.19** Esquema de un triple tratamiento térmico utilizado en los aceros grado herramienta D2 (Cary Howard B 2004).

Por otra parte, se observa en la figura 2.20, mayor dureza después de que el acero D2 fue revenido alrededor de los 540°C, este fenómeno es conocido como endurecimiento secundario y es causado por la transformación de la Austenita retenida durante el revenido a temperaturas cercanas a los 540°C. (Cary Howard B 2004). Cuando el acero puede ser revenido a la misma dureza, a más de una temperatura, es común seleccionar la temperatura más alta, la cual producirá la dureza deseable.



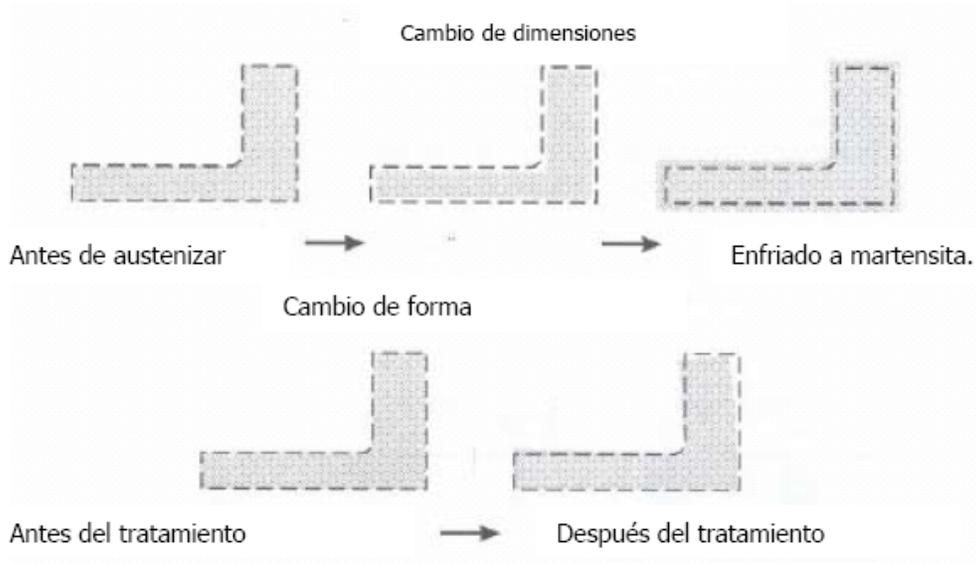
**Figura 2.20** Efecto del revenido en tres tipos de acero D2 (ASM Handbook Heat Treating 1998).

## 2.12 Control de la distorsión en acero grado herramienta AISIS D2

Los cambios dimensionales que puede sufrir una pieza a causa de un tratamiento térmico, son particularmente importantes en la manufactura, diseño apropiado y en el uso de la propia herramienta.

### 2.12.1 Naturaleza y causas de la distorsión

La distorsión en un término general que rodea todos los cambios dimensionales hay dos tipos principales: la distorsión por tamaño, la cual involucra la expansión o contracción en volumen o dimensiones lineales, sin cambios en la forma geométrica, producida por un cambio en la estructura del material durante el tratamiento térmico y la distorsión de forma, la cual implica cambios en la curvatura o en relaciones angulares, así como torcimiento, flexión y cambios no simétricos en dimensiones. Ver figura 2.21 (Richun Song, Satoshi Hanaki, Masato Yamashita 2008).



**Figura 2.21** Distorsión de forma y tamaño (Steven Thompson 1997).

### 2.12.2 Efecto de la Austenitización sobre la distorsión

La Austenitización comúnmente hace que los aceros de bajo contenido de Carbono menor de 0.25 % se contrae en lo que se refiere a volumen (Figura 2.21). El incremento de la contracción en el volumen disminuye, cuando cantidades de Carbono que se presentan en el contenido del acero aumentan; este volumen se puede aproximar en la ecuación 1 (Richun Song, Satoshi Hanaki, Masato Yamashita 2008).

$$V_{SA} = -4.64 + 2.21 \times \%C \quad (\text{Eq 1})$$

Donde  $V_{SA}$  es el cambio en el porcentaje de volumen que ocurre cuando la Ferrita y los carburos esferoidizados se transforman a Austenita. Al usar esta ecuación, es posible estimar el cambio de volumen en un acero AISIS D2, el cual presentara un cambio de volumen de -1.325% es decir que contraería en volumen esa cifra; es importante mencionar que estos cambios de volumen se presentarían siempre y cuando el material haya sido calentado a una temperatura suficiente en la que se disuelva todo el carbono en la Austenita.

### 2.12.3 Efecto del temple sobre la distorsión

Cuando un acero ha sido Austenizado, éste debe de ser enfriado lo suficientemente rápido de modo que la Austenita se transforme a Martensita. Es aquí que el acero se expande durante esta transformación (Figura 2.21), por lo que la expansión esta en proporción inversa de la cantidad de carbono que esta disuelto en la Austenita:

$$V_{AM} = 4.64 - 0.53 \times \%C \quad (\text{Eq 2})$$

Donde  $V_{AM}$  es el porcentaje en el cambio del volumen que ocurre cuando la Austenita se transforma a Martensita. De la misma manera en la que se calculo el cambio de volumen con la ecuación (1) para un acero AISI D2 con un contenido de 1.5%C para el caso de la ecuación (2) al aplicarla, este acero se

expandiría en un 3.845%; es así que se puede calcular el cambio neto en el volumen de la herramienta:

$$V_N = V_{AM} + V_{SA} \quad (\text{Eq 3})$$

Donde  $V_N$  es el cambio neto en el volumen de la pieza, que para el AISI D2 se traduciría en un cambio de 2.52% en volumen. (Richun Song, Satoshi Hanaki, Masato Yamashita 2008).

#### **2.12.4 Efecto del revenido sobre la distorsión**

El revenido produce varios cambios en la microestructura dependiendo de la temperatura y el tiempo de permanencia a esa temperatura. Después de un tiempo prolongado a temperatura ambiente o cortos tiempos a temperaturas por encima de los 200°C, la Martensita de alto Carbono (mayor a 0.6%C) se vuelve a Martensita de bajo Carbono. A temperaturas de revenido entre, 200 a 540°C, la Martensita se vuelve Ferrita + Cementita.

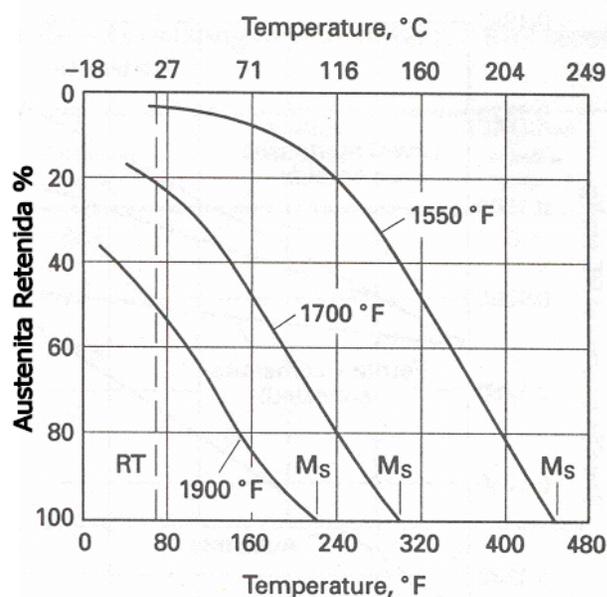
#### **2.12.5 Efecto de la Austenita retenida sobre la distorsión**

La transformación de la máxima cantidad de la Austenita a Martensita cuando el material se enfría para el temple requiere de un enfriamiento continuo hasta llegar a la temperatura final de transformación de la Martensita ( $M_f$ ), la cual para un acero grado herramienta eutéctico, es alrededor de -50°C.

Por lo que para prevenir la fractura de piezas muy grandes ó intrincadas, es muy común sacar la pieza del medio de temple y comenzar el revenido en esta, bajo estas condiciones, una proporción considerable de la estructura (10% ó más) posiblemente será Austenita. (L.P. Borrego 2009).

Por consecuencia, mas Austenita es retenida a temperatura ambiente en el acero AISI D2 el cual tiene mayor cantidad de elementos aleados. En el revenido a temperaturas crecientes que se encuentran en el rango de 120° a 260°C. Cierta cantidad de Austenita se transforma a Bainita o Martensita lo que trae una expansión en volumen.

La cantidad de Austenita retenida depende en gran medida del contenido de Carbono disuelto y en la temperatura a la cual la transformación del inicio de la transformación Martensítica. Se puede ver en la figura 2.22, que estos factores afectan el porcentaje de Austenita retenida.



**Figura 2.22** Efecto de Austenitización en la Austenita retenida (Cugat Mario 1999).

### 2.13 Distorsión de forma en el acero AISI D2

La resistencia de un acero AISI D2, disminuye de manera considerable por encima de los 600°C; cuando el material alcanza la temperatura de Austenitización, la carga de cedencia es tan baja que una deformación plástica ocurre a menudo, simplemente por los esfuerzos inducidos en la pieza debido a la gravedad. Sin embargo, piezas grandes, anchas y de formas complejas deben ser sostenidas apropiadamente de modo que se prevenga el pandeo. El

calentamiento rápido incrementa la distorsión de forma, especialmente en piezas con longitudes grandes y piezas complejas, las cuales contienen secciones ligeras y pesadas, de modo que si la velocidad de calentamiento es alta, las secciones ligeras incrementaran la temperatura mucho más rápido que las secciones gruesas o pesadas. Así mismo, las superficies en secciones pesadas incrementaran su temperatura más rápido que el anterior; todos estos factores son suficientes para que el material presente esfuerzos internos. De manera eventual, las porciones más calientes llegaran a alcanzar la temperatura del horno, mientras que las partes que están más frías continuaran elevando su temperatura. (L.P. Borrego 2009).

El calentar la pieza de manera lenta se minimiza la distorsión, de esta manera los diferenciales de temperatura que se crean en la pieza se mantienen bajos y los esfuerzos térmicos se mantienen dentro del rango elástico del material. La mas ideal para todo tratamiento térmico es que se inicie desde que el horno se encuentra frío ya que provee mayor libertad de distorsión. Sin embargo comenzar el tratamiento térmico cuando el horno se encuentra frío no es muy práctico ni eficiente en lo que refiere al gasto de energía, a menos que el tratamiento térmico sea hecho en un horno de vacío. Cuando la pieza se coloca en el medio de enfriamiento, puede ocurrir una gran distorsión de forma debido a las diferencias tan grandes de temperatura que existen entre las superficies y el interior, así como entre las secciones ligeras y pesadas del componente, este debido a los esfuerzos térmicos y mecánicos producidos durante la transformación Martensítica. Este problema se incrementa si la capacidad para endurecer el material es tan baja que es requerido un enfriamiento rápido para obtener la máxima dureza.

## CAPITULO 3

### ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRIO

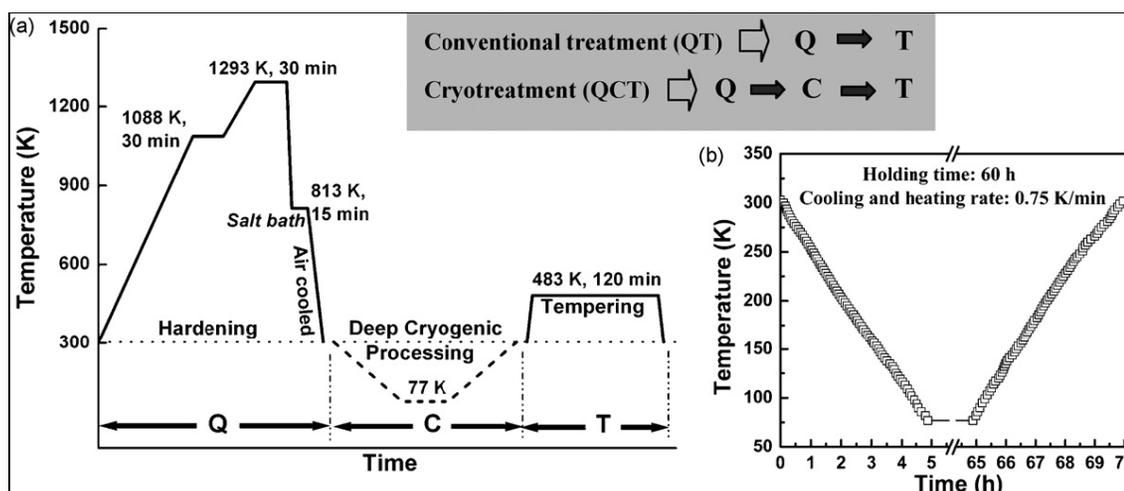
El objetivo principal del tratamiento térmico al herramental del estampado es incrementar la resistencia al desgaste. Uno de los principales problemas en el tratamiento térmico convencional es el contenido de Austenita retenida, que es suave, a baja temperatura, inestable y frágil además se transforma en Martensita durante el servicio. La transformación de Austenita a Martensita está asociada con aproximadamente un aumento de 4% por expansión del volumen, que esta provoca una distorsión de los componentes en servicio. Una alternativa para reducir este efecto es mediante un tratamiento térmico a baja temperatura (Criogénico  $-198^{\circ}\text{C}$ ) esto con el fin de prolongar su duración en servicio.

El beneficio del tratamiento criogénico es mejorar la resistencia de desgaste de herramientas. Unos investigadores (W. Reitz, J pendray 2001), sostienen que el aumento de la resistencia al desgaste sólo se produce debido a la transformación de la Austenita retenida a Martensita. Pero, este fenómeno no puede atribuirse únicamente a la reducción al mínimo de Austenita retenida (R.F. Barron 1982). Ya que se indica que el perfeccionamiento de los carburos secundarios es la principal causa de la mejora a la resistencia del desgaste

La literatura existente no proporciona ninguna directriz en relación con la selección del tiempo de duración del tratamiento criogénico (E.A. Carson 1990).

Existe una amplia variación en el tiempo seleccionado de retención incluso para el mismo material, esto se debe a la falta de investigación sistemática en relación con la influencia del tiempo de retención en la resistencia al desgaste de la herramienta para estampado. Un procedimiento experimental se ha efectuado con el fin de estandarizar dicho tratamiento, en una probeta de 24 mm × 16 mm × 85 mm de dimensiones es sometida a un Tratamiento criogénico (QCT), los detalles de cada paso se ilustra en la figura.

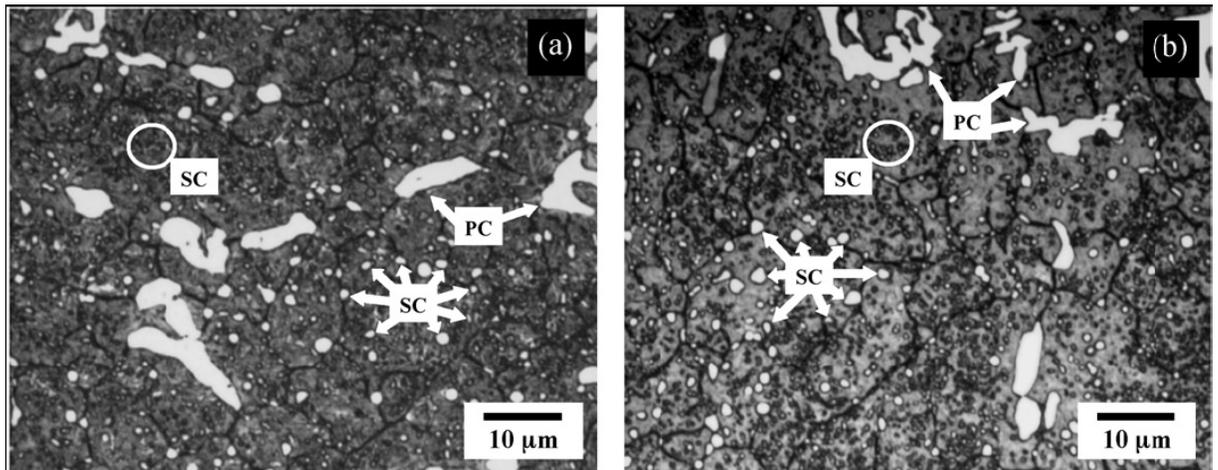
### 3.1



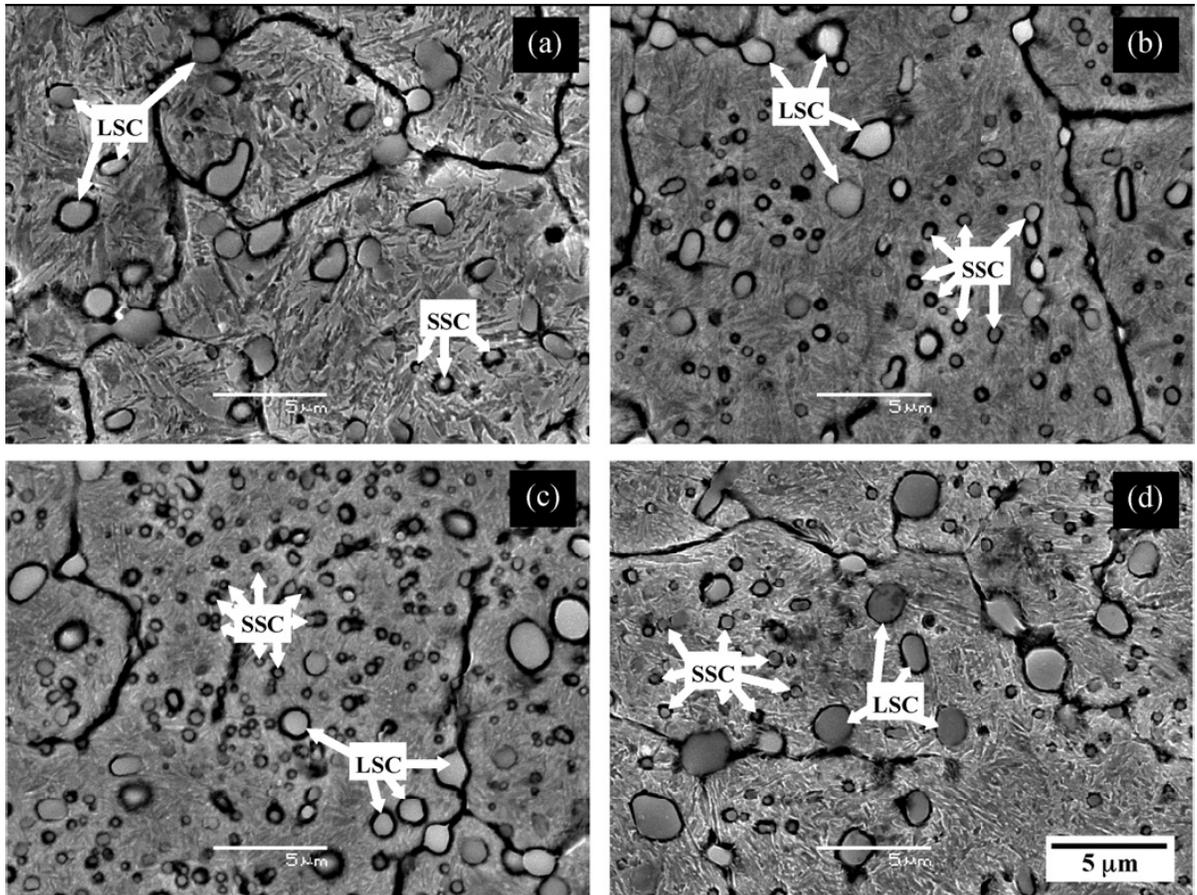
**Figura 3.1.** (a) Representación esquemática de la programación del tratamiento térmico a condiciones criogénicas que consiste en el endurecimiento de (Q), la transformación profunda criogénica (C) y templado (T), Ciclos de revenido, y (b) típico Perfil de temperatura-tiempo de una profunda transformación del ciclo criogénico. (D. Dasa, A.K. Duttab 2008).

### 3.1 Evaluación de comportamiento de desgaste

Pruebas de desgaste de deslizamiento en seco se realiza para determinar el incremento de la resistencia al desgaste bajo la siguiente norma ASTM G99-05(JIS Z-3158 1999). Microestructuras de forma diferente a un tratamiento térmico especímenes. Ver figuras 3.2 y 3.3.



**Figura 3.2.** Micrográficas ópticas (a) y QT (b) los especímenes QCT. Las microestructuras reveladas por el grabado con picral solución exposición carburos: blanco y templado martensita: negro (PC, carburo de primaria; SC, carburo de secundaria).(P.F. Straton 2007)



**Figura 3.3** Micrografías SEM típica de QT y QCT especimenes exhiben tamaño, morfología y distribución de los pequeños carburos secundarios (CDC) y los grandes carburos secundarios (LSC). (P.F. Straton 2007).

El comportamiento de resistencia al desgaste para un acero de la serie AISI D2 para estampado, tratado criogenicamente es mayor en comparación con el de un tratamiento térmico convencional, esto se atribuye a la ausencia casi total de las reservas por Austenita y más distribución homogénea de un mayor número de partículas más finas de carburos secundarios. Figura 3.3.

### 3.2 Composiciones químicas y curvas de revenido

Para un primer análisis del tratamiento térmico de los aceros herramienta, las curvas de revenido deben ser consideradas. Como se discutirá a continuación, tales curvas permiten que se entienda las propiedades finales

de los materiales, como también posibles fallas en el tratamiento térmico. La Figura 3.4 presenta la curva de revenido de los aceros herramienta para trabajo en frío más utilizado. La composición química y las normas internacionales de estos materiales se informan en la Tabla 3.1.

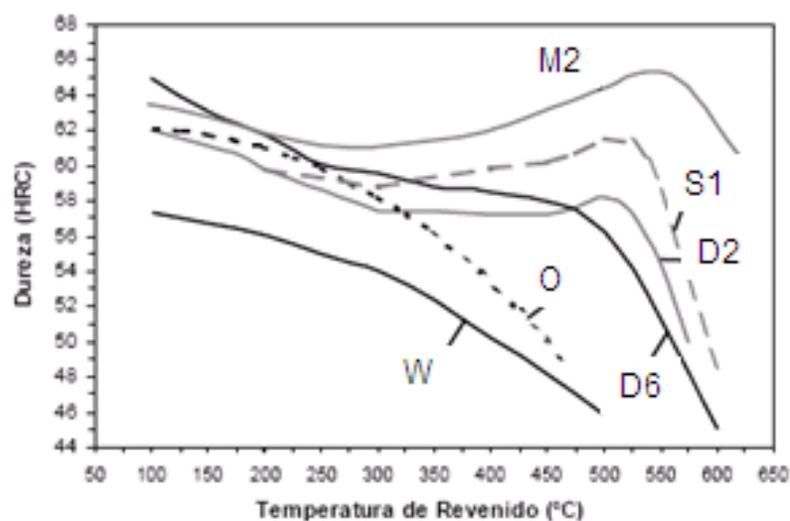
**Tabla 3.1** Composición química (% en peso) de los principales aceros grado herramienta. (ASM 1993).

<b>AISI</b>	<b>C % en peso</b>	<b>Si % en peso</b>	<b>Mn % en peso</b>	<b>Cr % en peso</b>	<b>Mo % en peso</b>	<b>W % en peso</b>	<b>V % en peso</b>
D6	2,10	0,30	0,30	11,5	---	0,70	0,20
D2	1,50	0,30	0,30	12,0	1,00	---	0,90
O1	0,95	0,30	1,3 0	0,50	---	0,50	0,10
S1	0,45	1,0	0,30	1,40	5,0	6,10	1,90
A2	1,00	0,50	0,95	5,13	1,15	---	0,33

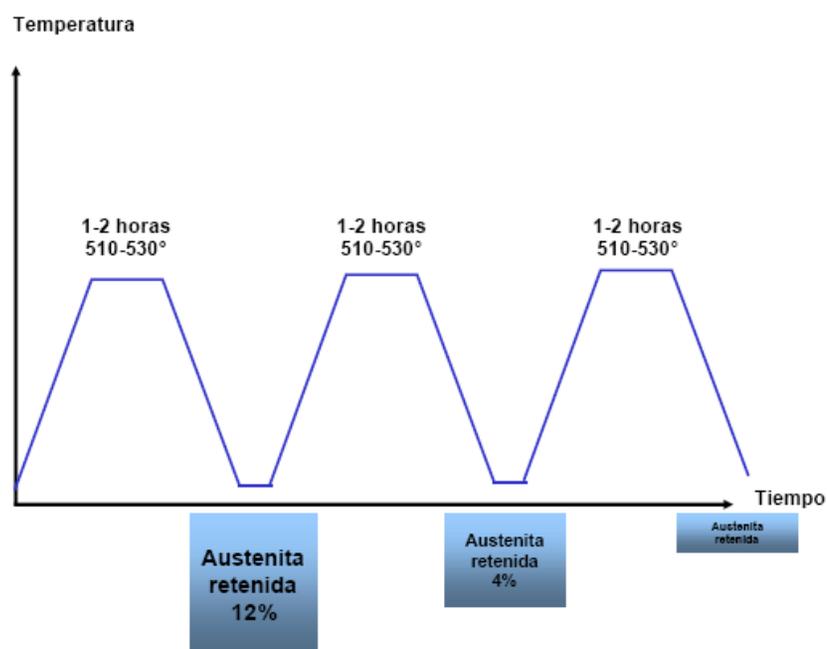
En primer lugar, las curvas de la Figura 3.4 muestran porqué los aceros son normalmente empleados para trabajos en frío. Los aceros para trabajado en frío, promueven alta dureza a bajas temperaturas, sin embargo, esta dureza no es estable en altas temperaturas. Entonces, si tales materiales fueran utilizados en procesos con calentamiento superior a los 500°C, la herramienta perdería dureza rápidamente, causando una falla prematura. Los aceros rápidos, por otro lado, poseen alta dureza si son revenidos a altas temperaturas, propiedad fundamental para su aplicación en herramientas de corte.

La curva del acero D2 es apenas representativa, ya que las condiciones de tratamiento térmico normalmente se especifican en función de la temperatura de Austenitización, y no de revenido, como lo demuestran las curvas de la Figura 3.5. Por ejemplo, para durezas de 60 a 62 HRC en el acero D2, es recomendable emplear Austenitización a 1130°C, fijando el revenido en 560°C, envés de Austenitización a 1220°C y revenido a 620°C. Esto ocurre

porque la primera condición conduce a una matriz microestructural más tenaz (ASM Handbook Heat Treating 1998).



**Figura 3.4.** Presenta la curva de revenido de los aceros herramienta para trabajo en frío más utilizado. (ASM Handbook Heat Treating 1998).



**Figura 3.5** Porcentaje de Austenita retenida en función de un triple revenido en un rango de temperaturas de 510 a 530°C. (Cary Howard B 2004).

# CAPITULO 5

## PROCESO DE PROYECCION TERMICA COMO ALTERNATIVA DE REPARACIÓN DE HERRAMIENTAS DE CONFORMADO

### 4.- Introducción a la Proyección térmica (thermal spraying)

El origen de la proyección térmica data del año 1910, cuando Schoop proyectó polvo de metal fundido sobre una superficie por primera vez. El procedimiento consistía en fundir un metal en un crisol y proyectarlo atomizado, mediante un gas comprimido, sobre la superficie a recargar en la que se solidifica. Posteriormente, salió al mercado un tipo de pistola alimentada por un alambre, que atravesando una llama originada por un gas combustible y otro comburente, era fundido y proyectado sobre el material a recargar, por una corriente de aire comprimido. Actualmente, los procedimientos más utilizados son:

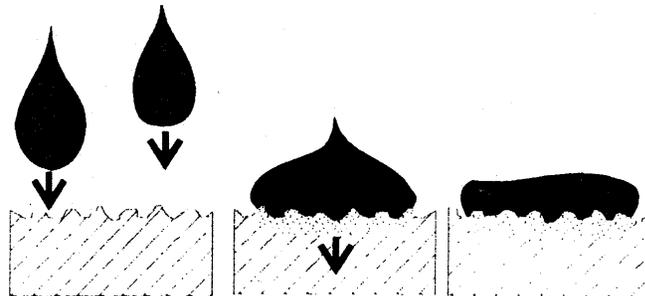
- Proyección de polvo por combustión (Flame power).
- proyección de alambre por combustión (Flame wire).
- proyección de alambre por arco eléctrico (Wire arc).

- proyección por plasma (Plasma spray).
- Detonación
- alta velocidad (HVOF).

El proceso de proyección térmica se puede definir como "la aportación de materiales proyectados en forma de partículas fundidas finamente divididas, sobre un substrato debidamente preparado". (J.C Tan, L. Looney 1999).Ç

El material a proyectar (en forma de polvo o varilla), es fundido mediante una energía obtenida a partir de la combustión de gases, de un arco voltaico o de una recombinación de gases plasmógenos, según el procedimiento empleado.

El material fundido es proyectado seguidamente sobre la pieza a recubrir en estado plástico con una alta energía cinética y térmica, que ceden a la misma (Figura 4.1), provocando la unión con una fuerza que va a depender del procedimiento empleado, de los parámetros utilizados, del material de aportación, del material del substrato así como de la preparación del mismo y de su temperatura antes, durante y después de la proyección. Los valores obtenidos para esta fuerza de anclaje pueden llegar a superar los 80 MPa.



**Figura 4.1** Formación de la capa (ASM Handbook 1998)

Tendrán también importancia en la calidad de un recubrimiento las reacciones químicas entre partículas, el tamaño de las mismas, (lo que va a influir en la transferencia de calor al sustrato), así como la forma de la pieza, la velocidad relativa de la pistola con relación a la pieza, el ángulo de incidencia de las partículas sobre la pieza, la distancia de proyección, etc...

Los pasos que se deben seguir en un proceso de proyección térmica son los siguientes:

- 1.- Limpieza de la superficie a recubrir.
- 2.- Preparación de dicha superficie (generalmente mediante un granallado con corindón sintético o granalla angular metálica).
- 3.- Proyección de la capa de anclaje, o de la capa directamente en el caso de que esta última sea autoanclaje.
- 4.- Mecanizado o rectificado final del recubrimiento si es necesario.

Cabe destacar que durante el proceso de proyección térmica, el material a recubrir no debe superar los 150°C para evitar los cambios estructurales o tensiones añadidas, lo cual implica que la proyección térmica puede ser considerada como un "recargue en frío", con excepciones tales como el sinterizado. (D. A. Shifler and L. K. Kohler, 2000).

Siendo de entre los recubrimientos de proyección térmica, el de proyección por plasma el que se ha escogido para realizar la presente conferencia, realizaremos una descripción más detallada de dicho proceso.

## **4.1 Método de proyección por plasma**

### **4.1.1 Técnica de la proyección por plasma**

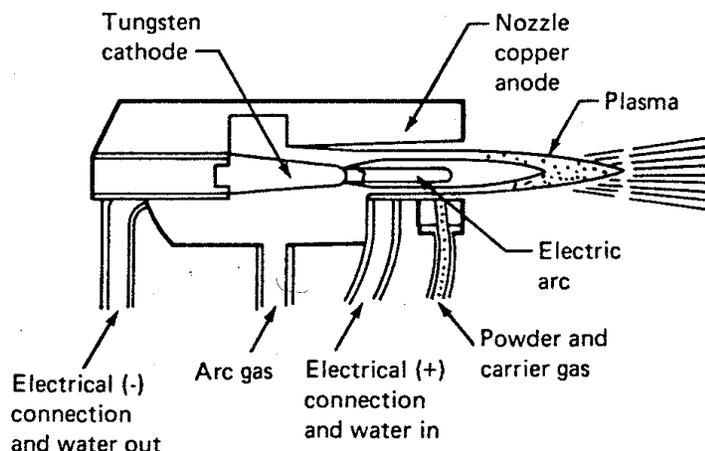
La técnica de proyección por plasma tuvo su origen en Alemania, en los años veinte, sin embargo, no fue hasta finales de los años cincuenta, cuando comenzó el proceso a ser ampliamente usado y considerado.

Esta técnica de proyección puede ser empleada con una amplia variedad de materiales, incluidos los cerámicos, y con un elevado rendimiento. Su empleo disminuye el riesgo de degradación del revestimiento y del sustrato, en comparación con otros procesos a altas temperaturas.

#### **4.1.1.1 Cañón de plasma**

Desde el año 1970, la técnica de la proyección por plasma ha experimentado una profunda evolución, a pesar de lo cual, el diseño del cañón empleado para la proyección de dicho plasma apenas ha sufrido modificaciones (L Lonney 1999).

Este dispositivo, que aparece ilustrado en la figura 5.2, consta de dos electrodos: un cátodo en forma cónica situado en el interior de un ánodo cilíndrico, que se extiende más allá del cátodo, formando una boquilla en su extremo. La refrigeración de los electrodos durante el proceso, se realiza por medio de unos circuitos con agua en circulación en su interior, lo que evita la fusión de dichos electrodos.



**Figura 4.2** Cañón de plasma-spray (ASM Handbook 1998).

El cañón comienza a operar cuando un impulso de corriente crea un arco entre los dos electrodos. Este arco es mantenido por una corriente estacionaria de elevada intensidad y con un potencial de alrededor de 50 voltios.

Un gas inerte fluye a través del espacio comprendido entre los dos electrodos, el cual y debido al arco eléctrico establecido disocia sus moléculas en sus átomos constituyentes ionizándolos. De este modo, el gas existente en el interior del arco se transforma en un conjunto de iones y electrones muy energéticos, es decir, un plasma. La corriente en su recorrido entre los dos electrodos alcanza la boquilla del cañón, formando allí una llama de plasma. Tanto la temperatura como la velocidad de dicho plasma son muy elevadas (J.C. Tan 1999), tal como se ve en la figura 4.3

#### **4.1.1.2.- Inyección del polvo**

El material que va a originar el revestimiento es transportado por medio de un gas portador, e inyectado en la llama de plasma, pudiendo estar el inyector de polvo situado en el interior o en el exterior de la boquilla.

La llama de plasma, acelera las partículas de polvo inyectadas, fundiéndose estas debido a la elevada temperatura del plasma. Estas gotas de material fundido salen dirigidas hacia la superficie del material a recubrir (substrato); allí se solidifican y acumulan, originando un recubrimiento protector grueso y compacto.

El criterio básico utilizado es que las partículas deben fundirse completamente, sin una excesiva vaporización, y permanecer fundidas hasta que colisionen con el substrato. Si las partículas no se funden suficientemente, puede resultar un recubrimiento de pobre calidad.

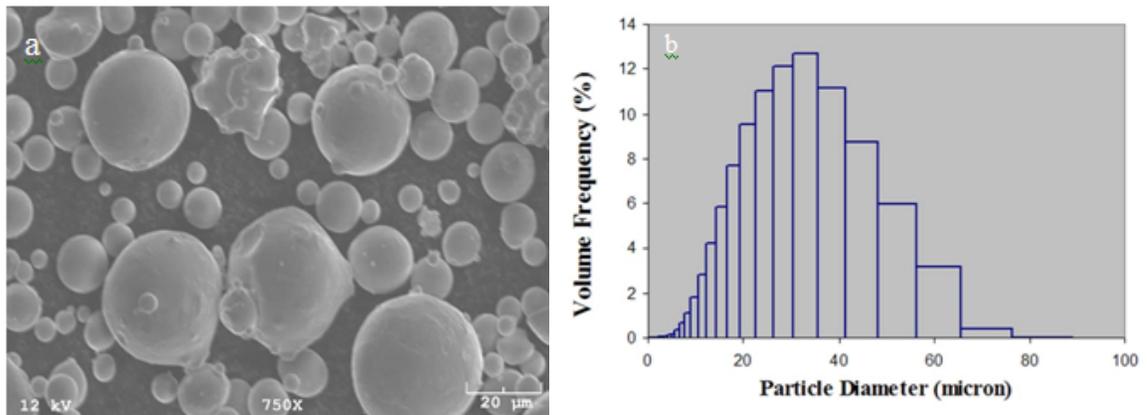
#### **4.2.- Parámetros a considerar**

##### **4.2.1.- Gases plasmógenos**

En la práctica, el argón o el nitrógeno son los gases primarios utilizados, junto con adiciones que varían entre el 5% y el 25%, de un gas secundario, normalmente hidrógeno o helio. Estos gases secundarios como el hidrógeno, consiguen una gran energía debido a la disociación de sus moléculas, que unido a la energía de ionización, origina el contenido calorífico del plasma. No obstante, la limitación en porcentaje de los mismos es debida al efecto negativo que tienen en la erosión de los electrodos.

#### 4.2.2.- Tamaño de partícula de polvo

Para cada material de revestimiento y para cada cañón de plasma existe un tamaño adecuado de las partículas del polvo, oscilando éste entre 5 y 60  $\mu\text{m}$ . Ver figura 4.3. Un tamaño superior al adecuado originará que las partículas no lleguen a fundirse, con lo cual podrán separarse de la llama o rebotar en el substrato sin adherirse a él. Por el contrario, un tamaño inferior al adecuado puede producir la vaporización de dichas partículas. (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).



**Figura 4.3** Tamaño de partícula y distribución en recubrimiento de acero D2 (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).

#### 4.2.3.- Modo de inyección del polvo

La forma en que las partículas se introducen en la llama condiciona su fusión y posterior deposición. La presión del gas portador del polvo, debe estar convenientemente ajustada para que las partículas lleguen a la llama, pero sin atravesarla. El flujo de gas requerido se determina en función de:

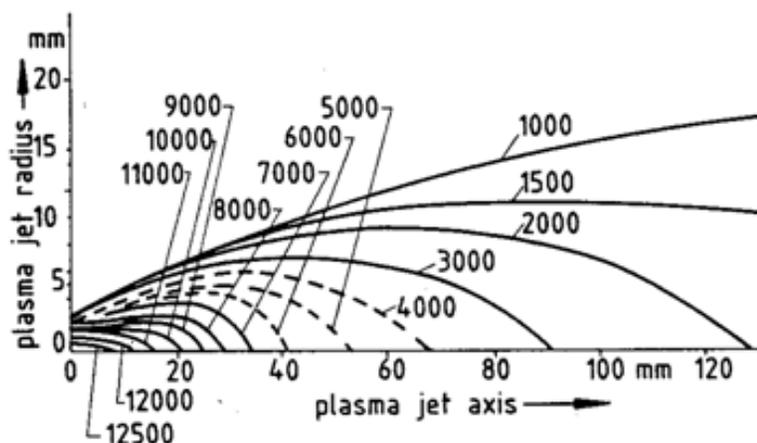
- 1.- Diámetro de la manguera de transporte.
- 2.- Densidad del polvo.
- 3.- Tamaño y forma del polvo.
- 4.- Velocidad y densidad del gas portador del polvo.

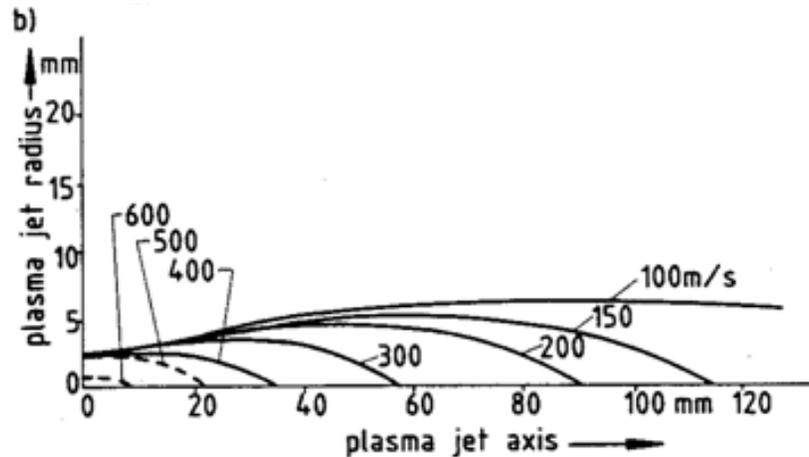
#### 4.2.4.- Distancia al sustrato

Cuando la proyección se realiza en contacto con el aire, las partículas de polvo comenzarán a enfriarse y desacelerarse al chocar contra las moléculas de aquel, una vez que han abandonado la llama de plasma. Por lo tanto, un factor básico a considerar es la distancia entre el cañón y la superficie a revestir, la cual suele oscilar entre los 5 y los 10 centímetros cuando la proyección se realiza en contacto con el aire. La eficacia de la proyección varía en función de la distancia de proyección (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).

#### 4.2.5.- Velocidad de las partículas

La velocidad de salida del plasma es del orden de los 600 m/seg, observándose que las partículas de polvo de mayor tamaño responden más lentamente a la aceleración imprimida por el gas, y que dichas partículas una vez aceleradas perdían velocidad más lentamente que el propio gas. La variación de la velocidad de las partículas de polvo en función de la distancia de proyección, aparece reflejada en la figura 4.4.

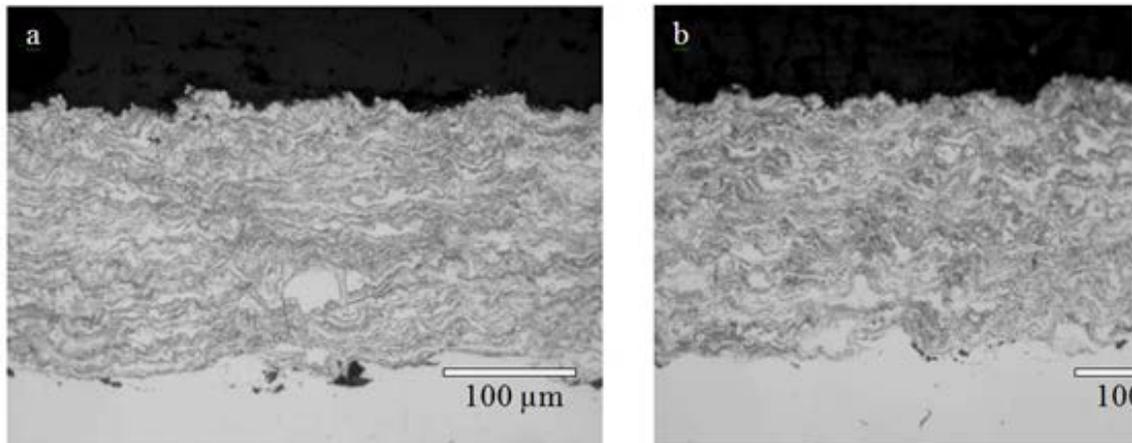




**Figura 4.4** Temperatura del plasma y velocidad de partícula (ASM Handbook 1998)

#### 4.2.6.- Interacción de las partículas con el sustrato

Cuando las partículas de polvo fundidas llegan al sustrato, colisionan con él; dicho sustrato ha de haber sido previamente sometido a un proceso de limpieza y de acabado superficial que le confiera cierta rugosidad para que aumente la adhesión del recubrimiento. Estas partículas se solidifican y van recubriendo todas las irregularidades del sustrato con el material proyectado (figura 4.5). Las partículas continúan llegando y acumulándose sobre el revestimiento en una cuantía que dependerá de la superficie a revestir y de la velocidad con que el cañón se mueva sobre dicha superficie.



**Figura 4.5** Formación de un recubrimiento, (J. Saaedi T. W. Coyle 2009)

#### 4.2.7.- Atmósfera de protección

En las propiedades que presente la capa depositada influirá de un modo decisivo el tipo de atmósfera en el que se realice la proyección. Así, según como sea dicha atmósfera, existirán dos posibles métodos de proyección: proyección por plasma en el aire y proyección por plasma en el vacío.

En el primer caso, APS (air plasma spraying), el proceso de proyección se produce en condiciones atmosféricas ambientales. Debido al efecto protector del haz inerte del plasma y los cortos períodos de estancia de las partículas en el plasma, las posibilidades de reacción del polvo con el aire son bastante limitadas. Los polvos de metales reactivos o de aleaciones pueden oxidarse algo en la superficie.

La elevada velocidad de solidificación y enfriamiento da lugar a que las estructuras de las capas de plasma sean de un grano muy fino, presentando mayor resistencia al desgaste.

El segundo de los métodos de proyección VPS (vacuum plasma spraying), se emplea cuando se exige de las capas depositados requisitos exigentes en lo que respecta a densidad, pureza, ausencia de óxidos y adherencia; en este caso la proyección se debe realizar en una cámara con atmósfera inerte. En la proyección plasma en vacío, la presencia de argón evita la reacción no deseada entre la atmósfera y el haz de plasma, el material de base o el material proyectado. El resultado son capas de mayor densidad, mejor adherencia y cohesión y estructura óptima.

### **4.3.- Aplicaciones**

A pesar de que la proyección por plasma es una técnica bastante reciente, las aplicaciones de la misma se han extendido considerablemente hasta el momento, siendo las principales las que se indican a continuación: (E. Turunen 2005)

- Protección contra diferentes mecanismos de desgaste: abrasión, adhesión y erosión.
- Protección ante los siguientes tipos de corrosión: oxidación, corrosión por gases calientes, atmosférica y corrosión por inmersión.
- Aislamiento térmico.
- Reparación de piezas con desgastes o defectos localizados
- Superficies que deben reunir cualidades especiales:
  - Aumento de la superficie específica
  - Recubrimientos con superficie activa o inerte
  - Aislamiento o conducción eléctrica
  - Capas autolubricantes
  - Superficies con propiedades catalíticas
  - Barreras de difusión

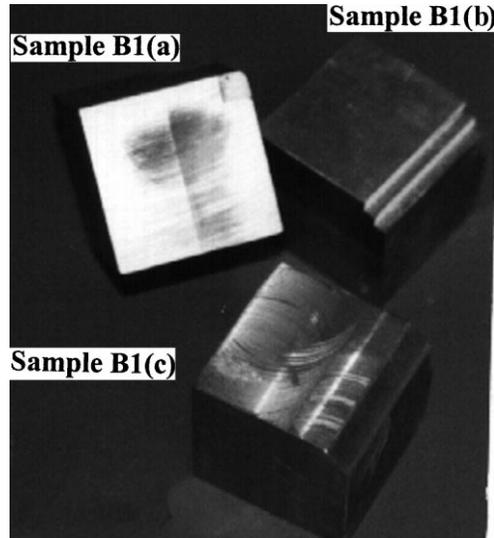
- Recubrimientos decorativos
  - Recubrimientos de absorción o reflexión luminosa
- Aplicaciones especiales:
- Fijación de sondas.
  - Fabricación de cuerpos con forma complicada
  - Fabricación de sensores
- Afino y esferoizado de polvos

#### **4.4 Alta velocidad (HVOF)**

El rociado térmico es el nombre genérico de la familia de procesos de revestimientos en cuyo material de revestimiento es calentado rápidamente en un gas caliente medio, y simultáneamente proyectado a gran velocidad dentro de una superficie de una sustancia la cual se construye hasta producir el revestimiento deseado.

En las últimas tres décadas las demandas de las industrias con alta tecnología, la industria aeroespacial, la industria automotriz, han liderado a grandes avances en el campo de rociado térmico. Nuevos materiales usados en esa industria frecuentemente requieren alta energía para ser procesados, y este desafío ha sido conocido en considerables sucesos. Ahora es posible rociar virtualmente cualquier material siempre que se derrita (o sea sustancialmente fundido) sin una degradación significativa durante una permanencia corta en la fuente de calor. Otro avance ha sido la mejora de las propiedades de revestimiento, y particularmente la reducción de la porosidad en los revestimientos. Esto ha sido alcanzado por el uso de nuevos métodos de post-tratamiento en los revestimientos rociados térmicamente, incluyendo compresión ultrasónica, presión isostática caliente y martilleo. Algunos procesos de rociado térmico también provee una muy buena superficie final, la cual es ahora de gran ocupación y regulación ambiental. (J.C. Tan, I. Looney 1999).

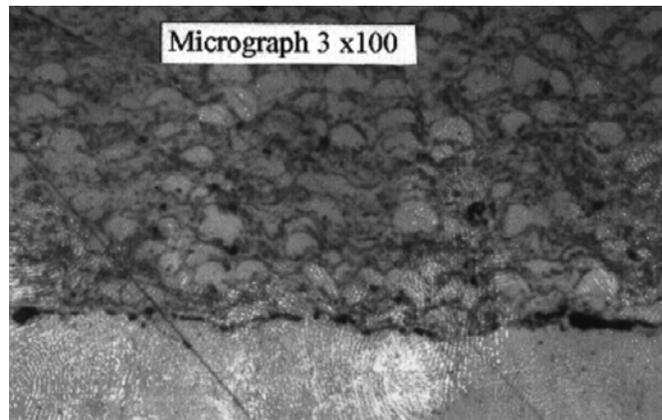
El desgaste de componentes ingenieriles es un problema considerable en las aplicaciones industriales. El desgaste puede ser causado por deslizamiento, impacto, abrasión, erosión y otras condiciones de servicio. El daño es progresivo, frecuentemente involucrando considerable pérdida de material. Mientras especificaciones inapropiadas de materiales en contacto con componentes pueden causar un pequeño incremento en el coeficiente de fricción, la velocidad de desgaste correspondiente puede variar alrededor de muchos órdenes de magnitud. En la figura 4.6 se muestran algunas matrices de acero grado D2, reparadas por la técnica de HVOF, en la cual se obtiene una mejor resistencia al desgaste y se logra prolongar la vida útil del componente.



**Figura 4.6** Muestras de matrices reparadas por la técnica de HVOF (J.C. Tan, I. Looney 1999).

El rociado térmico es potencialmente un medio rentable para componente de la dimensión de servicio de restauración tras el desgaste inducido. Nuevas superficies pueden ser provistas sin el material de distorsión causado por soldadura, o el gasto de técnicas de recubrimientos especiales. Además la nueva superficie puede ser creada usando el mismo material como el de la base, o con más desgaste o resistencia de corrosión del material.

El maquinado del rociado térmico en un material puede ser una tarea difícil. Los revestimientos rociados están compuestos por partículas bien definidas y poca conductividad térmica comparada con el mismo material forjado. Transferencia de calor lejos del punto de corte es lenta. Los métodos aceptables, prácticas y técnicas usadas para el maquinado de materiales cuando son rociados. Intrínsecamente, materiales que tienen resistencia a la abrasión son difíciles de maquinar. En orden de que el reparados “plug” no viene lejos del componente, la adhesión del material reparado al sustrato tiene que ser suficientemente fuerte a resistir las fuerzas que involucran el corte. En la figura 4.7 se muestra un ejemplo de la microestructura de una matriz D2 reparada por el proceso HVOF.



**Figura 4.7** Recubrimiento en la microestructura de un acero grado D2, antes del maquinado. (J.C. Tan, I. Looney 1999).

También, la cadena entre las partículas rociadas es primeramente mecánica, seguido de partículas individuales pueden ser empujadas si las presiones de corte son excesivas. Para aplicaciones en donde la superficie terminal es importante, es difícil de lograr el rociado para materiales con estructura porosa. Factores los cuales influyen en la elección del método final, incluye el tipo de material que será terminado, la forma de la parte, el final y tolerancia requerida y su economía. Herramientas de carbono son generalmente usadas para el maquinado de materiales para revestimiento fuertes como los cerámicos, carburos y cementados. Herramientas de ángulos,

velocidad de superficie y alimentación son críticas en el éxito del maquinado de estos revestimientos. Herramientas de ángulo inadecuadas y herramientas de presión pueden resultar excesivas en partículas de salida y destrucción de la ligadura sustrato de revestimiento.

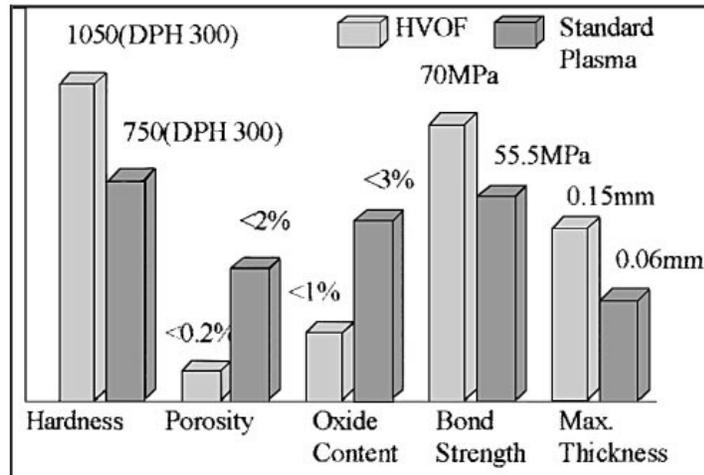
La gran velocidad del gas-oxy (HVOF) técnica de rociado térmica ha sido ampliamente adoptada en muchas de las industrias debido a su flexibilidad y costo-eficacia. Es normalmente utilizado para aplicar revestimientos a componentes para protegerlos contra el uso, calor y/o corrosión, pero a su vez tiene el potencial de reconstruir componentes desgastados. Como lo es el objetivo principal de este trabajo, la técnica de rociado HVOF para la reparación de acero grado herramienta (D2) dañadas.

Del proceso térmico de rociado, altas velocidades del oxy-gas (HVOF) el rociado térmico ha sido altamente adoptado en muchas industrias aunado su flexibilidad y su efectividad de costo. La tabla 4.1 detalla aplicaciones posibles del revestimiento HVOF en varias áreas industriales.

**Tabla 4.1** Principales aplicaciones de HVOF a nivel industrial (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).

Industria	Aplicación	Material
Papel	Ductos, rollos	WC-CO-Cr, Cr2O3
Acero	Desgaste, recubrimientos protectores	Cr2O3-Ni-Cr
Recubrimientos antioxidantes	Exteriores que funcionan como vista	Cr2O3
Electrónica	Materiales conductores	Cu
Construcción		AL2O3-Mo
Automotriz	materiales sometidos a fricción y desgaste	Al2O3-Mo- WC-CO-Cr, Cr2O3-Ni-Cr

La alta velocidad del proceso de oxy-gas es basado en una combinación de energía de transferencia térmica y cinética, la fusión y el aceleramiento de partículas en polvo, para depositar los revestimientos deseados. Las partículas en polvo del material de revestimientos deseado son alimentados axialmente a una corriente de gas caliente, luego a una pistola de rociado y fusionado, propulsados a la superficie con el trabajo de ser revestidas. Los gases de hidrógeno-carbón (propano, propileno, acetileno) o hidrógeno puro son usados como combustible de gases y la temperatura del gas depende de la elección del combustible de gas. La pistola consta de tres secciones: una zona de mezclado, la zona de combustión, y la boquilla. Durante la operación el cuerpo de la pistola es enfriado por aire o agua. El combustible y el oxígeno son mezclados por medio de chorros coaxiales y guiados a la zona de combustión donde una flama piloto o una ignición externa inician la combustión. Durante la combustión, el gas puede ser expandido en la boquilla, donde este es acelerado. El polvo es acelerado por un gas transportado e inyectado a una flama. El polvo tiene la misma dirección del flujo como el gas circundante expandido. En la entrada la zona de combustión a través de la boquilla las partículas de polvo son calentadas y son aceleradas. Debido a la alta velocidad y el alto impacto del polvo rociado, el revestimiento producido es menos poroso y tiene cadenas más fuertes que es producido por otros métodos. La figura 4.8 indica las características de los revestimientos HVOF comparados con aquellos producidos usando el proceso de rociado estándar de plasma.



**Figura 4.8** características de los revestimientos HVOF comparados con aquellos producidos usando el proceso de rociado estándar de plasma. (P.K. Ghostho 1992).

Los componentes de rociado térmicos de HVOF contienen tensiones residuales que resultan de la contracción durante el enfriado y la solidificación. La magnitud de las tensiones varía dependiendo sobre los parámetros del proceso, usado en el rociado de revestimientos. El material revestido puede romperse si la magnitud de la resistencia a la tensión de los esfuerzos residuales excede su adhesión con fuerza al sustrato. Los métodos que son generalmente usados para reducir la fuerza residual en los revestimientos incluidos: expansión de la fuerza de sustrato de rociado por pre-calentamiento, selección de un material de revestimiento con propiedades semejantes al sustrato.

# CAPITULO 5

## DISCUSIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Los desastrosos y costosos efectos del desgaste pueden ser reducidos considerablemente hasta en un 75% mediante la aplicación de recubrimientos protectores por medio de soldadura, y con el uso de una metodología correcta de los procesos de soldadura tradicional los cuales permiten incluso mejorar las características superficiales originales de los dados para estampado de acero grado D2, prolongando la duración en servicio de los componentes usados en el proceso de estampado.

Autores coinciden en el potencial que ofrece la aplicación de los recubrimientos protectores por medio de soldadura y conociendo detalladamente las condiciones de servicio de sus equipos, han comenzado a proteger preventivamente las superficies más críticas de éstos como norma de fabricación. La mejora de la microestructura del componente en servicio se realiza mediante técnicas localizadas en las zonas de trabajo.

Es de fundamental importancia seleccionar el sistema de soldadura apropiada así como el recubrimiento adecuado en función del mecanismo de desgaste presente. Por esto, la determinación de dicho mecanismo en forma acertada se convierte en la piedra angular del problema. El diagnóstico

acertado implicará la selección de un recubrimiento apropiado. En la práctica, los fenómenos de desgaste rara vez se presentan en su categoría elemental (abrasión, impacto, corrosión, calor, fricción, cavitación y erosión) sino que en general nos encontramos con que un componente está expuesto a una combinación de mecanismos de desgaste. El desgaste puede ser causado por deslizamiento, impacto, abrasión, erosión y otras condiciones de servicio. El daño es progresivo, frecuentemente involucrando considerable pérdida de material. Mientras especificaciones inapropiadas de materiales en contacto con componentes pueden causar un pequeño incremento en el coeficiente de fricción, la velocidad de desgaste correspondiente puede variar alrededor de muchos órdenes de magnitud.

El vertiginoso desarrollo que ha experimentado la tecnología de soldadura de recubrimientos protectores por medio de HVOF, permite hoy en día a la industria el poder contar con una amplia gama de aleaciones metálicas, cerámicas, carburos y compuestos metálicos orgánicos, para poder enfrentar las más severas situaciones de desgaste. El rociado térmico es potencialmente un medio rentable para componente de la dimensión de servicio de restauración tras el desgaste inducido. Nuevas superficies pueden ser provistas sin el material de distorsión causado por soldadura, o el gasto de técnicas de enchapado especial. Además la nueva superficie puede ser creada usando el mismo material como el de la base, o con más desgaste o resistencia de corrosión del material. Como control ajustado en las profundidades y extendido del material depositado no es posible el rociado térmico, un proceso final es requerido para componentes reparados usando esta técnica. Este amplio abanico de soluciones antidesgaste exhibe a la vez una completa clasificación de procesos y sistemas para su aplicación. La selección de un determinado proceso o sistema de soldadura para aplicar un recubrimiento antidesgaste queda determinada por los siguientes factores:

- Mecanismo de desgaste.
- Forma y dimensión del componente.
- Cantidad de aleación en aplicación (Kilogramos).
- Requisitos de aplicación y/o dificultades de acceso.
- Necesidades de acabado de la superficie.

El proceso de rociado térmico HVOF, exitosamente ha sido utilizado para la reparación de acero D2 grado herramienta con diferentes profundidades de daño, esto se logra solo si el sustrato y el material de reparación tienen similar o propiedades físicas correspondientes.

La elección de una adecuada matriz del metal de fabricación, parámetros óptimos de tratamiento térmico, y en particular una óptima reparación de los daños herramienta puede ampliar sustancialmente la vida útil de la herramienta, en la mayoría de los casos favorables incluso hasta el 100%. En los talleres de reparación por soldadura, los factores decisivos son el proceso de soldadura utilizada, el material de relleno añadido, las medidas tomadas antes, durante y después de la soldadura, la habilidad del soldador. La aplicación de una metodología adecuada para reparación de soldadura puede aumentar la calidad de la soldadura y poder regresar el componente a servicio nuevamente. Un tratamiento térmico post soldadura a temperaturas criogénicas, ayuda a mejorar la resistencia al desgaste en un 75% en el acero grado herramienta D2, ya que ocurre un perfeccionamiento de los carburos secundarios principalmente  $M_{23}C_7$ , entre otros carburos, lo cual aumenta su vida útil del herramental para estampado.

# CAPITULO 6

## CONCLUSIONES

Sobre la base de la revisión bibliográfica se concluye lo siguiente:

En la actualidad no se cuenta con una metodología adecuada para establecer el modo adecuado para lograr una reparación exitosa, es importante conocer y tener un sistema de detección de posibles fallas, un chequeo periódico mediante ensayos no destructivo es conveniente, para así evitar la propagación de grietas y se tenga que remplazar el componente.

En la industria automotriz específicamente en el área de estampados se utiliza a nivel de operaciones dos procesos convencionales de soldadura para la reparación de los dados de estampado de acero grado herramienta D2, dichos procesos son el SMAW y GTAW. Por otra parte existe a nivel experimental un proceso no convencional llamado HVOF, el cual logra obtener deposiciones de hasta 3 milímetros de espesor para poder recuperar diámetros y poder regresar el componente a servicio. Dicha técnica es conveniente debido a que la temperatura máxima en la deposición que se alcanza para este material es de 667°C lo cual es conveniente debido a que no se transforma de fase el sustrato en este caso acero D2, lo cual es un problema con los procesos convencionales.

La expansión por cambio de volumen de la fase de Austenita a Martensita que es aproximadamente del 4%, genera una gran cantidad de esfuerzos residuales lo cual aunado a la naturaleza propia del proceso crea zonas susceptibles al agrietamiento.

Hay que tomar en cuenta todas las consideraciones establecidas en la metodología para poder establecer el modo más conveniente para la reparación de estas componentes como lo puede ser un tratamiento térmico adecuado para disminuir los esfuerzos residuales generados durante el proceso de soldadura.

Un tratamiento térmico de triple revenido ha mostrado resultados en cuanto a la disminución de la fase de Austenita, con lo cual se logra que el material sometido a la reparación no se genere tantas zonas susceptibles al agrietamiento a si poder lograr prolongar la vida útil del componente en servicio. Otra alternativa es un tratamiento térmico a temperaturas criogénicas  $-196^{\circ}\text{C}$ , después de haber realizado la reparación. Estudios han demostrado, que al someterlo a esta temperatura al acero grado herramienta D2 se optimiza la microestructura y ocurre un refinamiento de los carburos secundarios haciendo que estos tengan una mayor resistencia al desgaste hasta en un 75% e inmediatamente un relevado de esfuerzos es conveniente.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1- Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión. (2001), Curso de formación de Ingenieros Europeos de Soldadura. Madrid. 2003. Pp.17 -19.
- 2- ASM Handbook (Revised vol. 4) Metals Handbook. (1998), Title proper has changed with v.4: ASM Handbook/Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee. Includes bibliographies and indexes. Contents: v. 4. Heat Treating. pp 413-428.
- 3- Burgos Solas, José. (1996), Relleno superficial por soldadura. Curso recuperación de piezas por soldadura. Universidad Central de Venezuela. pp 216-222.
- 4- American Society for metals. Publication ASM. United States of American, (1993). 403-411 p.
- 5- Chavanne, R. L., (1999), Forty-four ways to improve the hardfacing operation. Revista Welding Journal. (EUA) Vol. 62, No 5. pp 15-18.
- 6- Cary, Howard B., (2004), Modern Welding Technologies. New Yersey. Third edition. Regents Prentice Hall. Pp 176-181.
- 7- Cugat, Mario. (1999). Nuevo tratamiento para incrementar la vida y rendimiento de moldes para la deformación metálica y matrices de corte. Metalurgia y electricidad (España) No 610. pp 86-89.
- 8- Colectivo de autores CIS. (2005), Apuntes para la asignatura soldadura. pp. 214-226.

- 9- Díaz Cedré, Eduardo; Ortiz Méndez, Tamara Ma. (2003), Curso de Recuperación de Piezas. Universidad del Valle del Cauca. Cali. Colombia, pp 18-26.
- 10- Doyen, P.S.; Skrabec, Q. R.(1997) A new technique for welding tool steel. Welding Journal. (EUA) Vol 60, № .9 .pp. 25 – 28.
- 11- Frolov, V.V. (1998), Teoría de los procesos de soldadura. Moscú. Ed. Vyshaia Shkola. Pp 552.
- 12- Griñak, I.(1994), Soldabilidad de los aceros. Moscú. Ed. Mir. Pp 341-342.
- 13- Haro, Sergio R.; Rito Pinedo, R. (1999), Predicción del riesgo de fisuración en frío en función de la composición química. Suplemento del 4to Congreso de Soldadura. México. Pp 97-101.
- 14- Losano, G.; Morgenfeld, J. (2001), Criterios para evaluar el riesgo de fisuración en caliente. Revista Soldadura volumen 4, No 11. pp 326-327.
- 15- Malishev, B. D. (1999), Soldadura y corte en las industrias de construcciones. Tomo I. Moscú, Ed. Mir. Pp. 198-199.
- 16- Norma JIS Z 3158. (1999), Method of Y-Groove weld Cracking Test. pp 7-9.
- 17- Steven Thompsom. (1999), Handbook of Mold, tool and dies. Woodhead. 211p.
- 18- The Lincon Electric Company.(2006), The procedure handbook of arc welding. Pp 1.

- 19- James F (1999), Lincoln Arc Welding Foundation Bulletin. Agrietamiento en la soldadura. Guía para la fabricación y Montaje de construcciones de acero soldadas. Pp 86-88.
- 20- Weld Mold Company. (1999), Technical Welding Handbook. Product Catalog, Michigan USA. Pp.85
- 21- Weld mold company Catalogue. (2000) Tool, Die and Maintenance welding product. Brighton-USA. Pp 113.
- 22.- D. Dasa, A.K. Duttab, K.K. Rayc. (2008), Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel. Pp. 297-310.
- 23.- W. Reitz, J. Pendray, (2001), Cryoprocessing of materials: a review of current status, Mater. Manuf. Process 16 P.829–840.
- 24.- P.F. Stratton, (2007), Optimising nano-carbide precipitation in tool steels, Mater. Sci. Eng. A 449–451 P. 809–812.
- 25.- E.A. Carlson, (1990), Cold Treating and Cryogenic Treatment of Steel in ASM Handbook, vol. 4 Heat Treating, 10th ed., ASM International, Metals Park, OH, Pp. 203–206.
- 26.- R.F. Barron, (1982), Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance, Cryogenics 22 Pp.409–413.
- 27.- J.C Tan, L, looney (1999), Component repair using HVOF thermal spraying, materials processing research centre, volume 93, number 93 pp 203-208.
- 28.- Daoa, M. Huaa,, T.M. Shaob, H.Y. Tama (2009), Surface modification of DF-2 tool steel under the scan of a YAG laser in continuously moving mode,

Journal of Materials Processing Technology, volume 209, number 89, pp 4689–4697.

29.- Richun Song, Satoshi Hanaki \*, Masato Yamashita, Hitoshi Uchida, (2008), Reliability evaluation of a laser repaired die-casting die, Materials Science and Engineering A, volume 483 number 484 pp. 343–345.

30.- P. K. GHOSH P KAUSHAL and K SHARMA, (1992), Influence Tungsten Thermal of Heat Treatment Carbide Embedded Spray Process on the Nickel Properties Base of Coating Wear Resistant Produced by Gas, ISIJ International, Voi. 32, No. 2, pp. 250-256.

31.- L.P. Borrego a,\* , J.T.B. Pires b, J.M. Costa c, J.M. Ferreira, (2009), Mould steels repaired by laser welding, Engineering Failure Analysis Volume 16, number 15 pp. 596–607.

32.- J.M. Costa a,\* , J.M. Ferreira a, C. Capela b, (2008), Fracture toughness of the heat affected zone on Nd-YAG laser welded joints, Engineering Failure Analysis Volume xxx, Number xxx pp. xxx–xxx.

33.- R. Ebner, h. Leitner, f. Jeglitsch, d. Caliskanoglu (1999) "Tool Steels in the next century" 5th International Conference on Tooling pp. 56-59.

34.- H. Berns (1992) "New Materials Processes Experiences for Tooling" International European Conference on Tooling Materials Interlaken pp. 113-117.

35.- M.B. Beardsley,( 1997) think thermal barrier, coatings for diesel engines, vol. 6, number 2 pp. 181-186.

36.- C. Bernhardt, (1994), particle size analysis, chapman & hall

37.- J. Karthikeyan, C.C. Berndt, S. Reddy, J-Y Wong, A.H. King and H. Herman, (1998), nanomaterial deposits formed by DC plasma spraying of liquid feedstocks, j. am, ceram. Soc., vol 81, number 1, pp. 121-128.

## Listado de Figuras

Numero	Figura	Pagina
2.1	Aspecto general de moldes utilizados en la industria automotriz: a) molde para trabajado en frío, b) molde para trabajado en caliente, c) molde para inyección de plástico.	15
2.2	Aplicaciones de aceros para trabajado en frío.	17
2.3	Metalografía del acero D2, con diferentes técnicas de ataque: a) Atacada con Nital al 10%, Revela los bordes de granos, carburos y Martensita ligera.	19
2.4	Ángulo de incidencia de partículas abrasivas	21
2.5	Descripción del mecanismo de desgaste de abrasión bajo esfuerzo	22
2.6	Descripción del mecanismo de desgaste de abrasión por desgarramiento	23
2.7	Descripción del mecanismo de desgaste de impacto	23
2.8	Mecanismo de desgaste de fricción	25
2.9	Áreas sensibles al agrietamiento: a) Cercano a un ángulo interior, b) En un escalón, c) Cercano a ángulos interiores, d) Cercano a un inserto y e) Reparación de la cavidad en un molde.	37
2.10	Forma del hundimiento: a) Soldadura de reparación después de maquinado y b) Vista Transversal.	38
2.11	Técnica para contrarrestar el hundimiento: a) Sección transversal antes de la soldadura, b) Cordones finos en la primera pasada y c) Reparación completa.	39
2.12	Representación de socavaduras a ambos lados de un depósito: a) Sección de moldes separados, b) Vista transversal.	40
2.13	Esquema de la técnica de arrastre para contrarrestar la socavadura. a) Se deposita con sentido desde el centro hasta el borde de la zona de hundimiento. b) se sitúa la varilla contra el depósito y se reduce el amperaje. c) mientras el depósito está en estado plástico se arrastra la varilla hacia el borde, d) se extingue el arco y se desprende la varilla cuando aún esté en estado plástico.	40
2.14	a) sección de una herramienta a la que se le realizará una reparación mediante un depósito a tope de penetración completa. b) sección completamente restringida. c) vista desde A, penetración completa de la primera pasada. Siempre se debe soldar primero por el lado de la restricción. d) resanar la primera pasada y completar las pasadas de raíz.	41

2.15	Diagrama isotérmico del acero AISI D2 Austenizado a 954°C.	49
2.16	Diagrama isotérmico del acero AISI D2 Austenizado a 980°C	49
2.17	Dureza contra temperatura de Austenitización en un acero D2 que contiene 1.5%C.	50
2.18	Austenita retenida en acero D2 contra temperatura de Austenitización 1.60 %C, 0.33 %Mn, 0.32 % Si, 11.95 %Cr, 0.25 %V, 0.79 %Mo, 0.010 %S, 0.015 %P.	50
2.19	Esquema de un triple tratamiento térmico utilizado en los aceros grado herramienta D2.	52
2.20	Efecto del revenido en tres tipos de acero D2.	53
2.21	Distorsión de forma y tamaño.	53
2.22	Efecto de Austenitización en la Austenita retenida.	56
3.1	(a) Representación esquemática de la programación del tratamiento térmico a condiciones criogénicas que consiste en el endurecimiento de (Q), la transformación profunda criogénica (C) y templado (T), Ciclos de revenido, y (b) típico Perfil de temperatura-tiempo de una profunda transformación del ciclo criogénico.	59
3.2	Micrografías ópticas (a) y QT (b) los especímenes QCT. Las microestructuras reveladas por el grabado con picral solución exposición carburos: blanco y templado martensita: negro (PC, carburo de primaria; SC, carburo de secundaria).	60
3.3	Micrografías SEM típica de QT y QCT especímenes exhiben tamaño, morfología y distribución de los pequeños carburos secundarios (CDC) y los grandes carburos secundarios (LSC).	61
3.4	Curva de revenido de los aceros herramienta para trabajo en frío más utilizado.	63
3.5	Porcentaje de Austenita retenida en función de un triple revenido en un rango de temperaturas de 510 a 530°C.	63
4.1	Formación de la capa.	66
4.2	Cañón de plasma-spray.	68
4.3	Tamaño de partícula y distribución en recubrimiento de acero D2	70
4.4	Temperatura del plasma y velocidad de partícula.	72
4.5	Formación de un recubrimiento.	73
4.6	Muestras de matrices reparadas por la técnica de HVOF.	76

4.7	Recubrimiento en la microestructura de un acero grado D2.	77
4.8	Características de los revestimientos HVOF comparados con aquellos producidos usando el proceso de rociado estándar de plasma.	79

## Listado de Tablas

<b>Numero</b>	<b>Tabla</b>	<b>Pagina</b>
2.1	Clasificación de aceros para herramientas según AISI-SAE.	16
2.2	Recomendaciones de composición química del metal de aporte para la soldadura, en zonas de trabajo de diferentes aceros para herramienta en estado endurecido para soldar con GTAW y SMAW.	34
2.3	Pre calentamiento para la soldadura de aceros grado herramienta.	35
2.4	Parámetros recomendables para el temple del acero A2 y D2.	48
3.1	Composición química (% en peso) de los principales aceros grado herramienta.	62
4.1	Principales aplicaciones de HVOF a nivel industrial.	78