

6.1. CONCLUSIONES.

6.1.CONCLUSIONES.

Tres eran los principales problemas de la operación de enderezado en el proceso de mecanizado de la cremallera de dirección:

- Alto tiempo de ciclo de enderezado: el tiempo medio de ciclo era de 75s y el objetivo bajarlo a 50s.

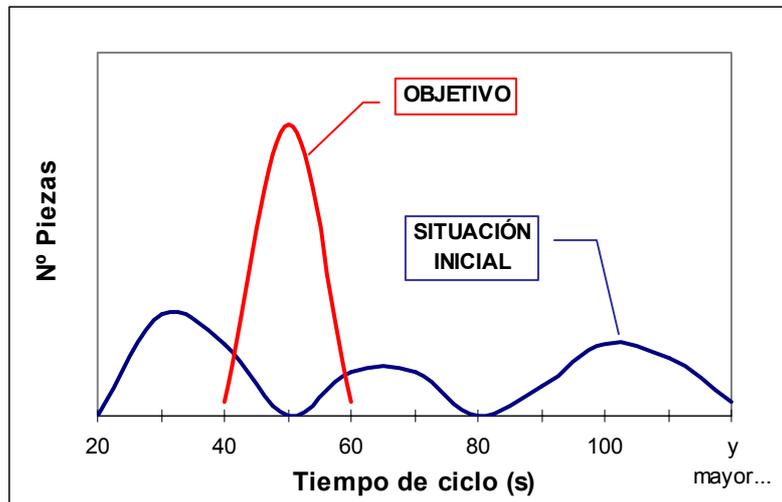


Fig. Con.1: Tiempo de ciclo inicial vs objetivo

- Alta deformación de la pieza: la deformación longitudinal de la pieza era de 3500 μm y el objetivo bajarla de 2000 μm (medidas TIR tomadas por la enderezadora).

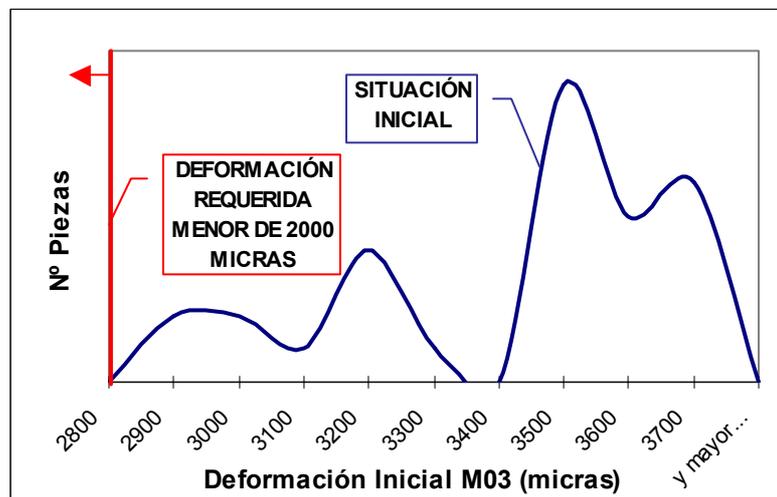


Fig. Con.2: Deformación inicial vs objetivo

- Grietas y roturas durante el enderezado: se producían en los valles del dentado durante el golpeo de la pieza; el objetivo era eliminarlas por completo.

El excesivo tiempo de ciclo unido a la chatarra producida por las grietas y por las piezas que no se conseguían enderezar con éxito provocaban un aumento del coste de producción de 109475€ por año, de ahí que se decida llevar a cabo el presente proyecto para intentar paliar esta situación.

La máquina enderezadora toma medidas de las piezas antes y después de cada golpe para determinar si la medida que se está corrigiendo está por debajo de la tolerancia especificada o no; por tanto el primer paso es confirmar que el problema lo tenemos en el proceso y no en el sistema de medida. Para ello se realizan unos Isoplots de las medidas tomadas por la enderezadora y del calibre manual (reloj comparador) utilizados.

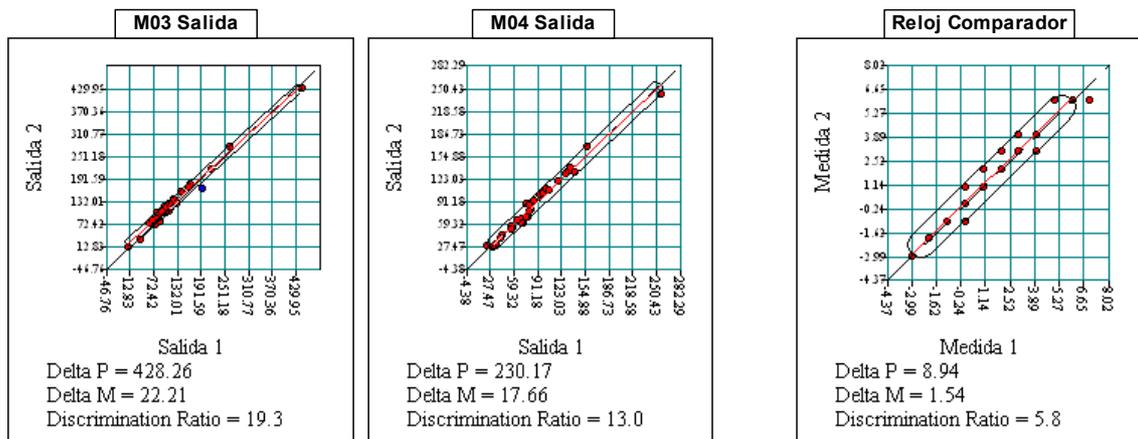
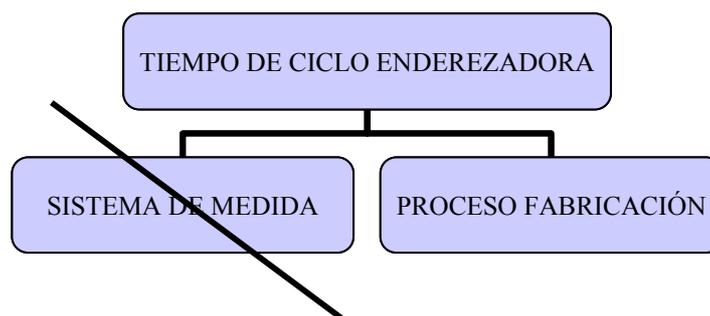


Fig. Con.3: Isoplots de la salida de la enderezadora

Fig. Con.4: Isoplot del calibre manual

Considerando aceptables los resultados obtenidos se puede afirmar que la causa raíz del problema se encuentra en el proceso.



Estableciendo, inicialmente, un control de la deformación de la pieza a su llegada a la enderezadora y del tiempo de ciclo de la misma, se pone de manifiesto que:

- Existen dos familias de piezas en cuanto a deformación se refiere:

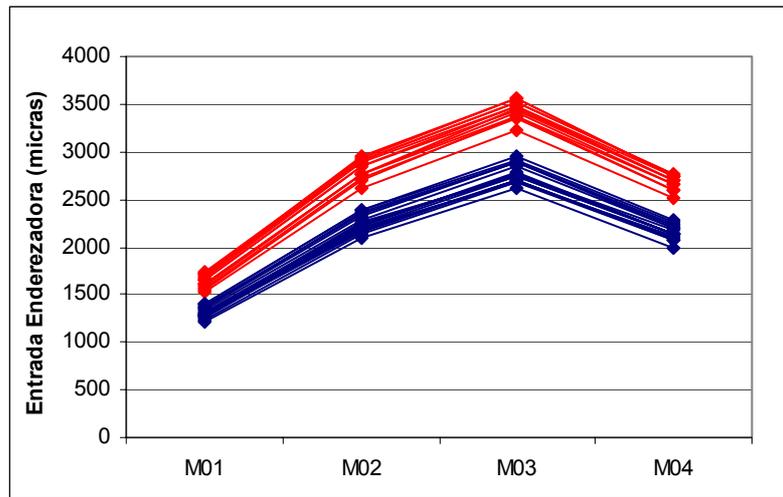
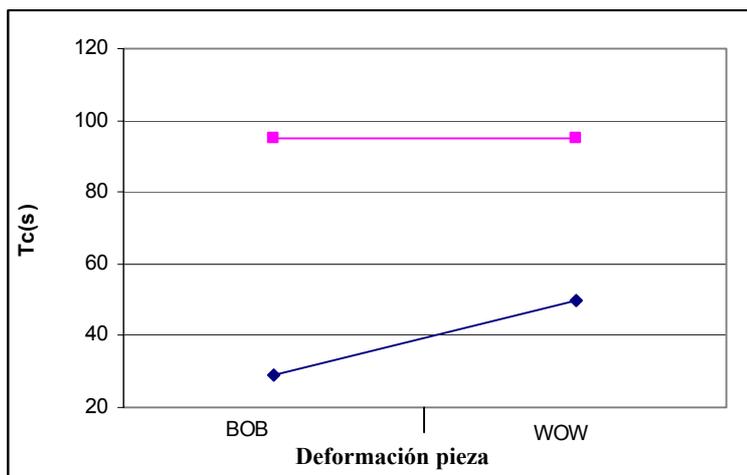
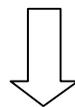


Fig. Con.5: Deformación de las piezas a la entrada de la enderezadora

- Mayor deformación de las piezas implica un mayor tiempo de enderezado.
- Las piezas con menor deformación pueden tener tanto tiempos de enderezado bajos como altos.



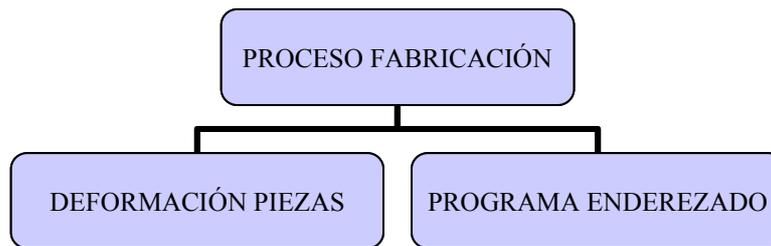
MEJORAR DEFORMACIÓN INICIAL



MEJORAR PROGRAMA DE ENDEREZADO

Fig. Con.6: División del proyecto en dos partes

Por tanto, es necesario mejorar primero la deformación con la que llegan las piezas a la enderezadora, para después optimizar el programa de enderezado adecuadamente. Es en este punto donde se observa que la causa del alto tiempo de ciclo tiene dos orígenes y donde el proyecto se divide en dos partes:



1ª Parte: Mejora de la deformación de la pieza.

El proceso completo del mecanizado de la cremallera consta de:

- Rectificado del diámetro exterior.
- Rectificado del dentado.
- Temple por inducción de la parte posterior del dentado.
- Temple por inducción-conducción del dentado.
- Revenido.
- Enderezado automático.
- Lijado.

Un estudio de la deformación longitudinal que va adquiriendo la pieza en cada una de las operaciones deja ver que:

- La mayor deformación se produce en el temple del dentado, seguida de la producida en el temple de la parte posterior del mismo.

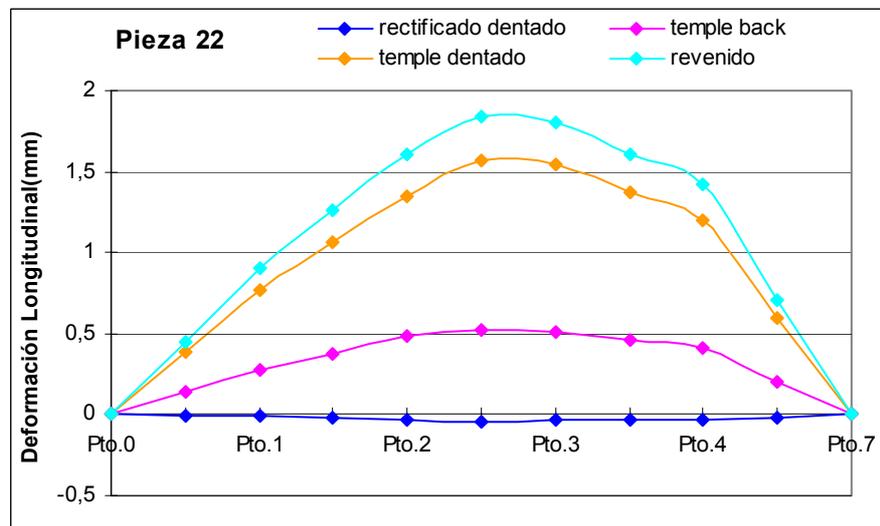


Fig. Con.7: Deformación longitudinal de la pieza a lo largo del proceso (Prueba 3).

- En el temple de la parte posterior del dentado se producen las dos familias de deformación de piezas, debido a que la máquina tiene dos inductores.

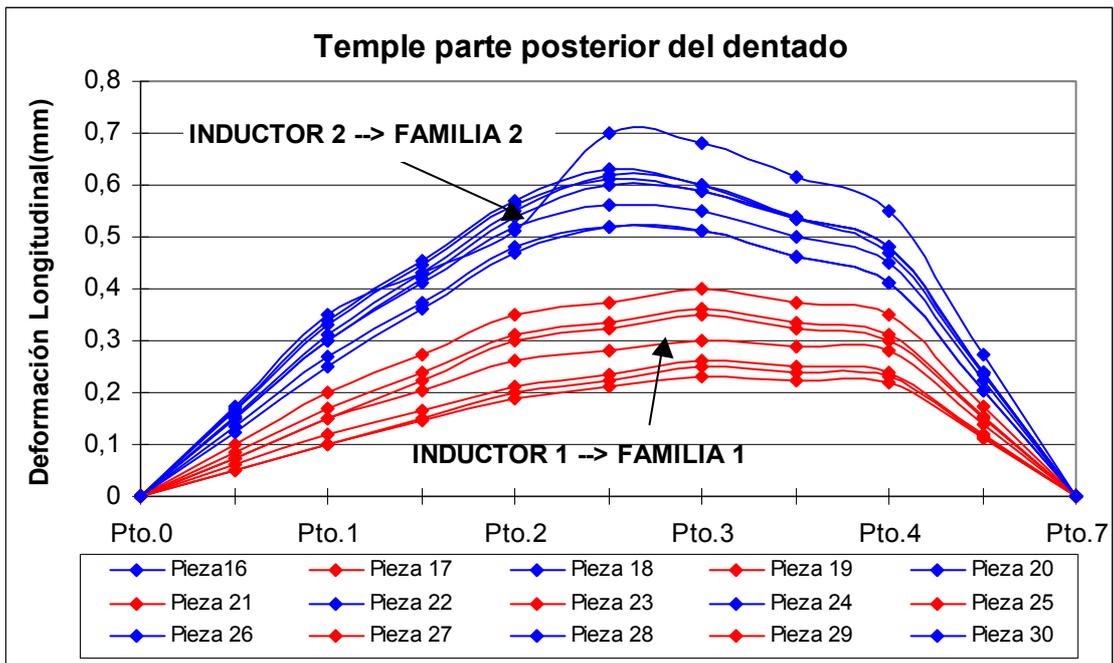


Fig. Con.8: Deformación de la pieza tras el temple de la parte posterior del dentado

Por lo tanto, se enfoca el estudio hacia los procesos de temple por ser los que mayor deformación provocan en la pieza.

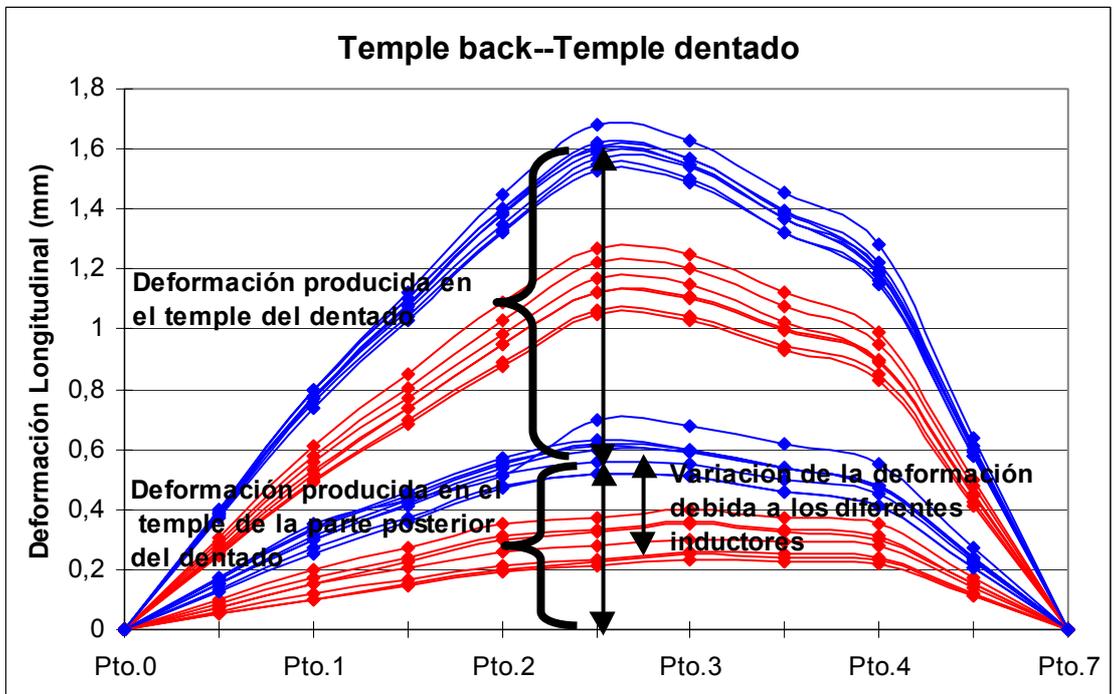


Fig. Con.9: Deformación de la pieza tras el temple de la parte posterior del dentado y del temple del dentado.

Aun sabiendo que la deformación producida en el revenido no es la que mas afecta a la pieza, se comprueba la influencia de la temperatura del mismo, no observándose ninguna variación en la deformación ni en el número de grietas.

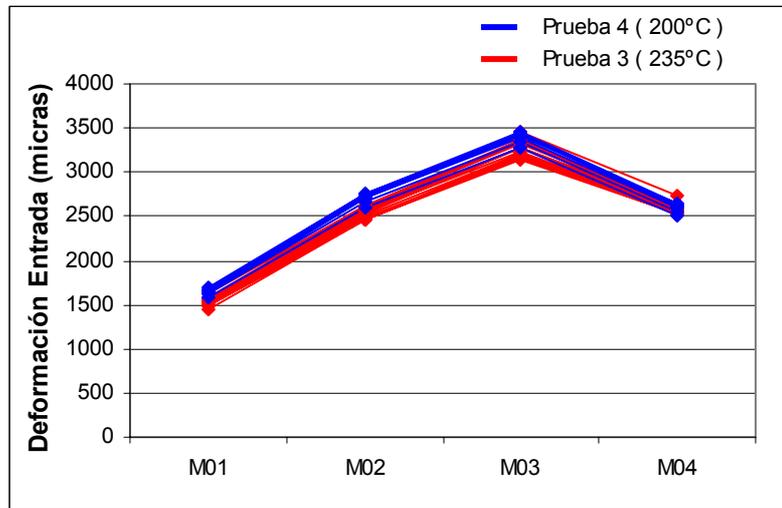
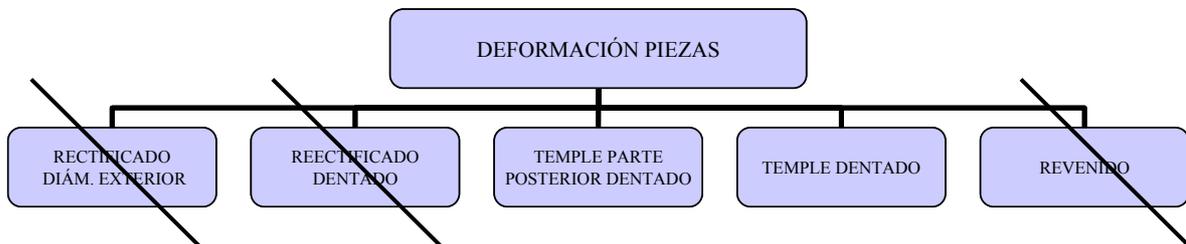


Fig. Con.10: Deformación de las piezas a la entrada de la enderezadora con revenidos a distintas temperaturas

Luego se achaca la gran deformación con la que llegan las piezas a la enderezadora a los procesos de temple, siendo las deformaciones adquiridas en las otras operaciones poco significativas comparativamente.



Temple de la parte posterior del dentado.

El inductor número 2 es el que mayor deformación provoca en las piezas (dando lugar a lo que se ha llamado familia de piezas número 2):

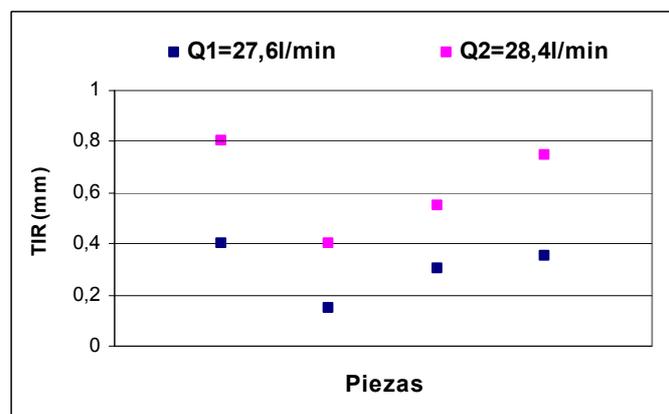


Fig. Con.11: Deformación TIR de las piezas tras el temple de la parte posterior del dentado

Se comprueba que cada inductor trabaja con distinto caudal de líquido de temple (aunque dentro del margen especificado), por ello, se estudia la influencia que tiene en la deformación de la pieza.

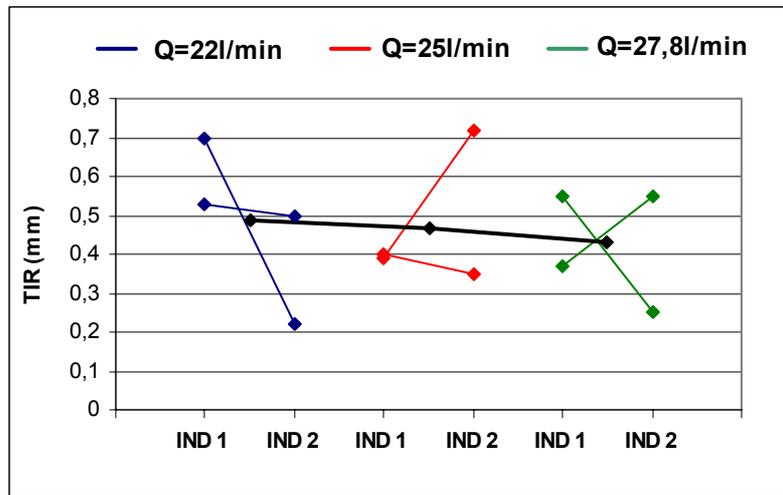


Fig. Con.12: Influencia del caudal de líquido de temple en la deformación en el temple de la parte posterior del dentado

Es tan pequeña esta influencia que no se le puede señalar como la principal causa raíz del problema en esta inductora.

Por otra parte se observa un empeoramiento, con el paso del tiempo, de la deformación de una familia con respecto a otra.

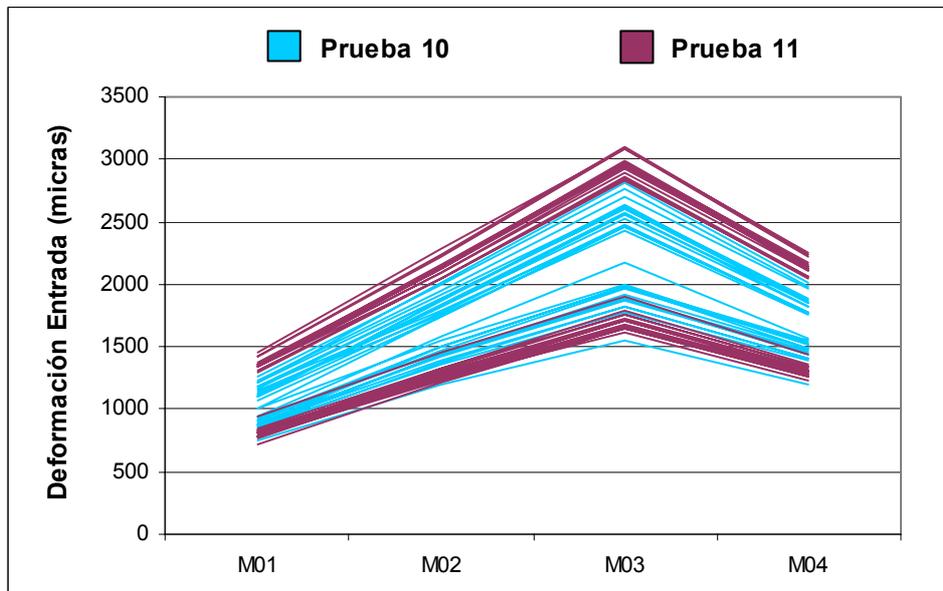


Fig. Con.13: Empeoramiento de la deformación de la familia 2 en el transcurso de seis días

Tras una limpieza de las duchas e inductores, un ajuste mecánico de los mismos y una optimización de los caudales de líquido de temple, se obtiene un acercamiento entre las deformaciones provocadas por ambos inductores, siendo ahora muy parecidas entre sí.

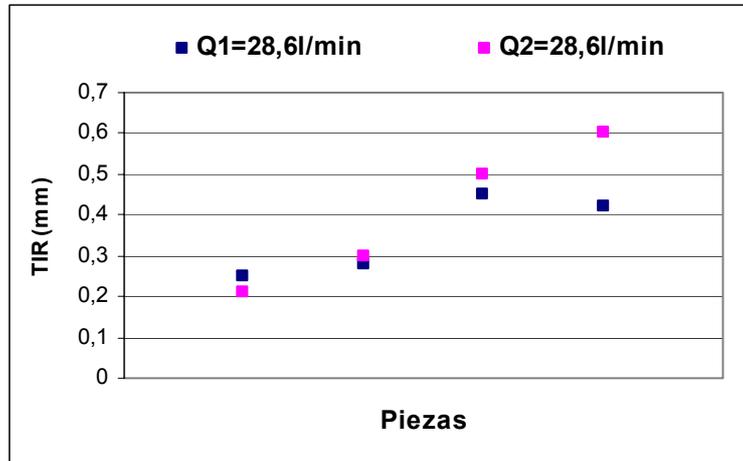
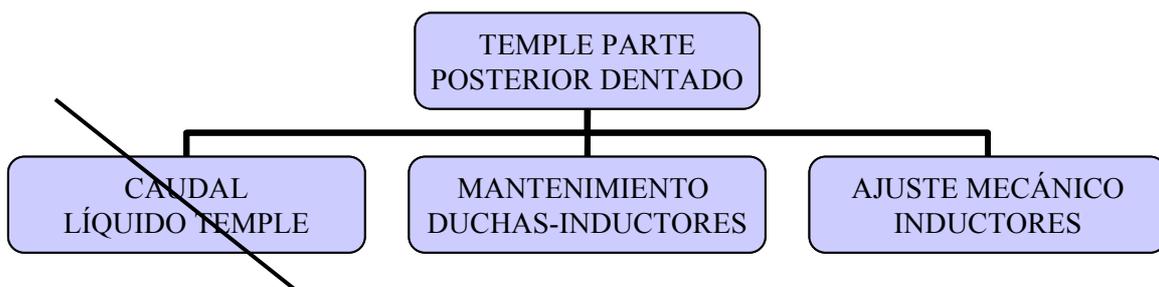


Fig. Con.14: Deformación TIR de las piezas tras el temple de la parte posterior del dentado

Si bien en esta inductora no se ha conseguido bajar significativamente la deformación de las piezas, sí se ha señalado el desajuste mecánico de los inductores como la principal causa raíz de la aparición de las dos familias de piezas. Por supuesto, un buen mantenimiento de las duchas e inductores es imprescindible para obtener un buen proceso de temple.



Temple del dentado.

La introducción de un cilindro empujador que se opone a la deformación que va adquiriendo la pieza durante el temple del dentado hace disminuir drásticamente la deformación con la que llegan las piezas a la enderezadora.

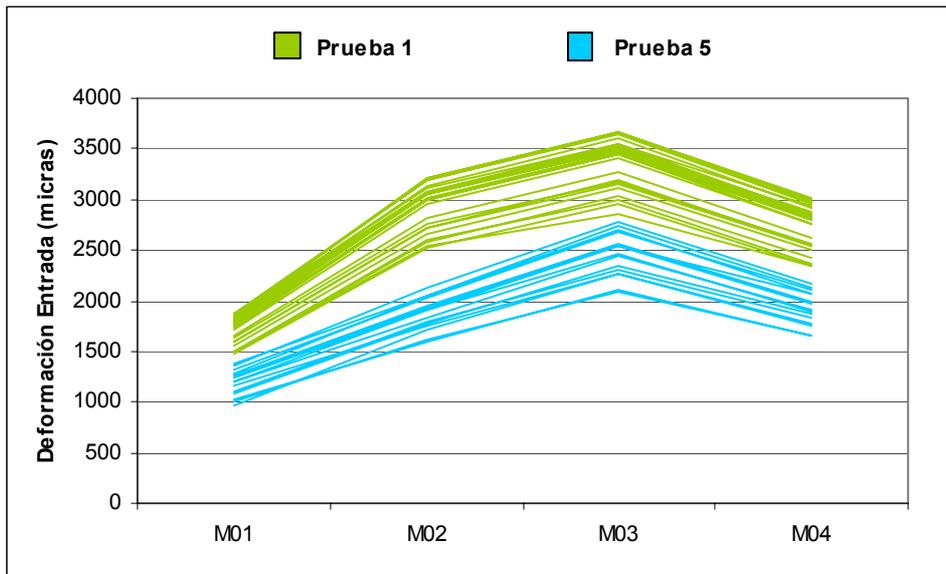


Fig. Con.15: Deformación de las piezas a la entrada de la enderezadora (Prueba 5 con cilindro empujador)

Este cilindro empujador sólo actúa mientras se lleva a cabo el enfriamiento del dentado después del calentamiento.

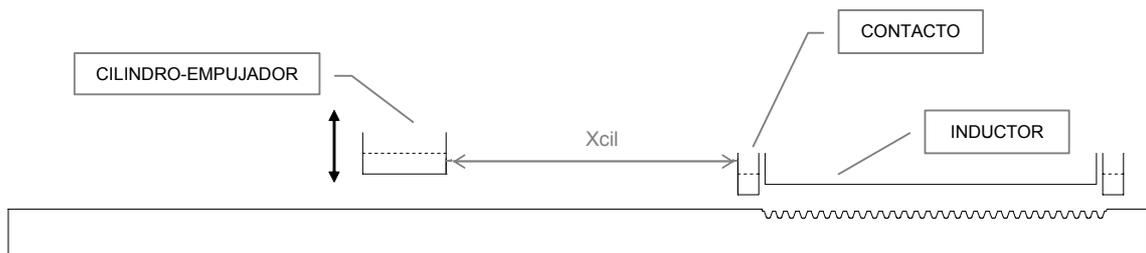
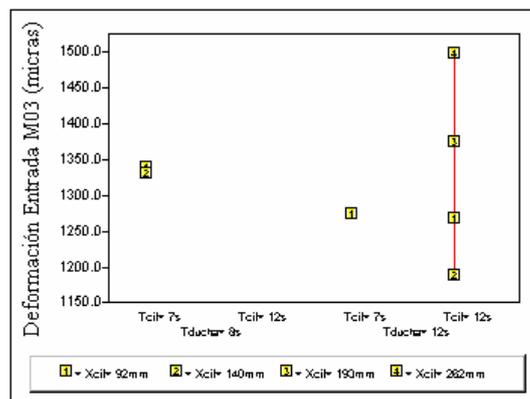


Fig. Con.16: Croquis de la cremallera en la inductora del dentado

El tiempo de actuación del cilindro y el tiempo de ducha del líquido de temple no influye mucho en la deformación de la pieza, no así el punto donde trabaja el cilindro empujador. La mejor opción es $T_{cil} = 12s$, $T_{ducha} = 12s$ y $X_{cil} = 140cm$ como pone de manifiesto el siguiente gráfico:

Fig. Con.17: Influencia del tiempo de ducha, del tiempo de actuación del cilindro empujador y de la posición de éste en la deformación



- Influencia del tiempo de calentamiento en la deformación de la pieza:

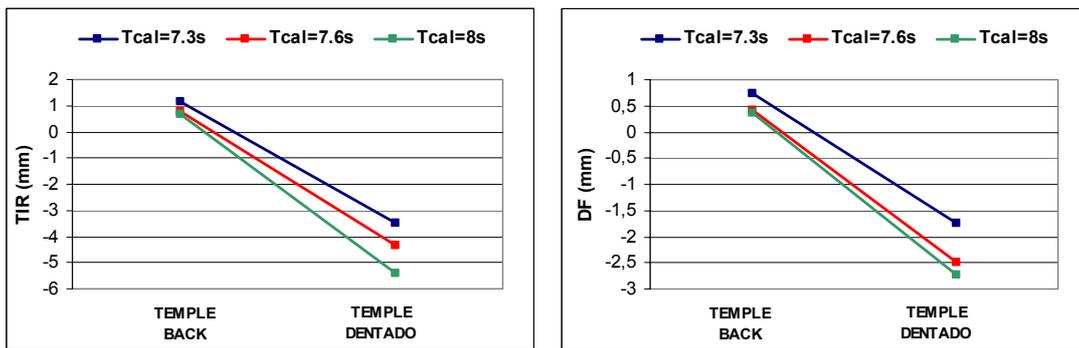


Fig. Con.18: Influencia en la deformación de las piezas del tiempo de calentamiento del temple del dentado ($Q_{back}= 0l/min$; $X_{cil}= 140mm$)

Como se observa en los gráficos la variación considerada para el tiempo de calentamiento afecta muy poco a la deformación.

- Influencia del caudal de la ducha de la parte posterior del dentado:

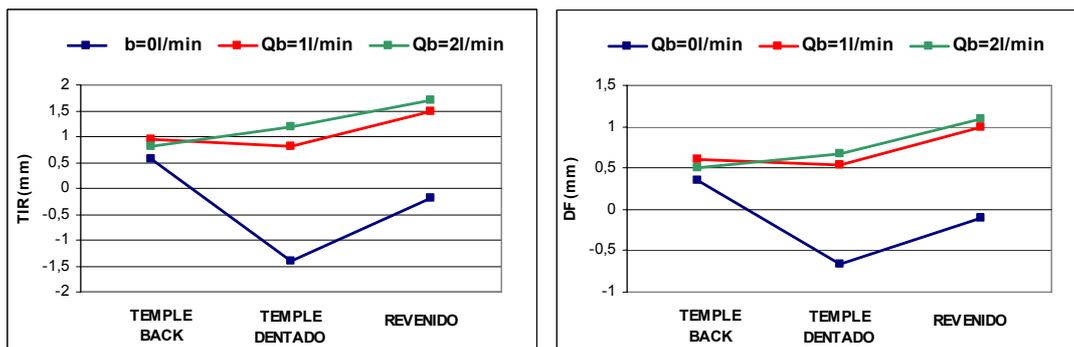


Fig. Con.19: Influencia en la deformación de las piezas del caudal de la parte posterior del dentado ($T_{calen}= 7.3s$; sin cilindro empujador)

Este caudal tiene, pues, una gran influencia en la deformación de la pieza. Conforme disminuye el caudal se obtiene una deformación menor en la pieza, llegando, incluso, a alcanzar deformaciones en sentido contrario (deformaciones negativas) para caudales próximos a cero, siendo esta tendencia mas acusada todavía si además actúa el cilindro empujador:

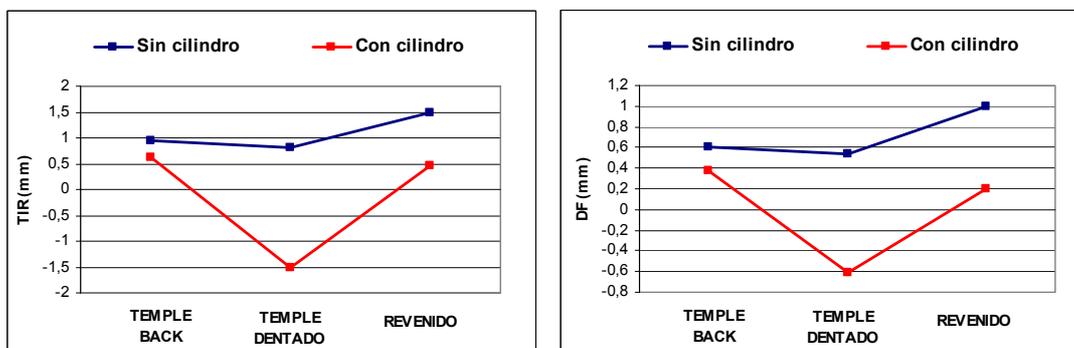


Fig. Con.20: Influencia en la deformación de la pieza del cilindro empujador ($X_{cil}= 140mm$; $Q_{back}= 1l/min$; $T_{calen}= 7.3s$)

El objeto de esta ducha es la de mantener la parte posterior del dentado fría durante el calentamiento del mismo, para que no disminuya su dureza (especificación mínima de 50 HRc).

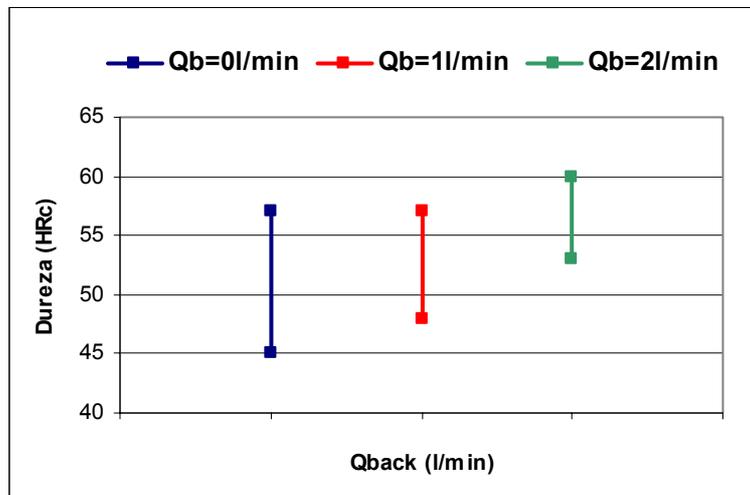
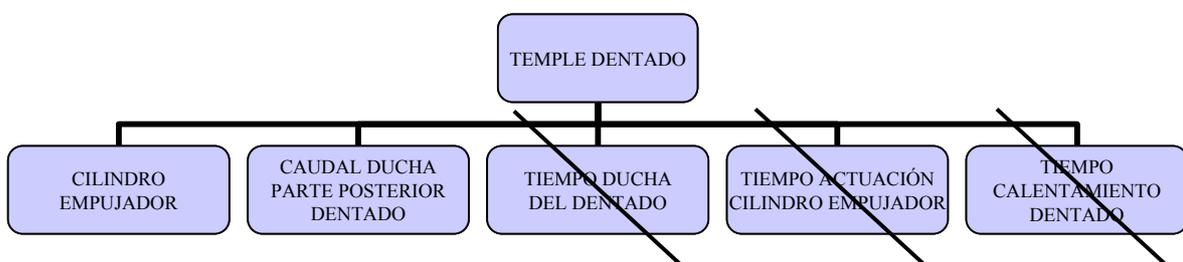


Fig. Con.21: Influencia en la dureza de la parte posterior del dentado del caudal del mismo (Tcalen= 7.3s ; Sin cilindro empujador)

El caudal ideal sería pues, el más bajo que proporcionase la menor deformación posible en sentido positivo tras el revenido y una dureza que cumpla las especificaciones exigidas. La deformación final ha de ser en sentido positivo para que la enderezadora golpee preferentemente sobre la parte posterior del dentado y no sobre los dientes de la cremallera, ya que podría deformarlos.

Hay que señalar también que la deformación en el revenido sea cual sea la deformación con la que llegue la pieza del temple es siempre en dirección hacia un sentido positivo y del mismo orden (ver Fig. Con.19).

Por tanto, la mejora en la deformación de la pieza se consigue, fundamentalmente, mediante la instalación de un cilindro empujador y la disminución del caudal de la ducha de la parte posterior del dentado durante la operación del temple del mismo.



La influencia que estos dos factores tienen en la deformación de la pieza se pone claramente de manifiesto en los siguientes gráficos.

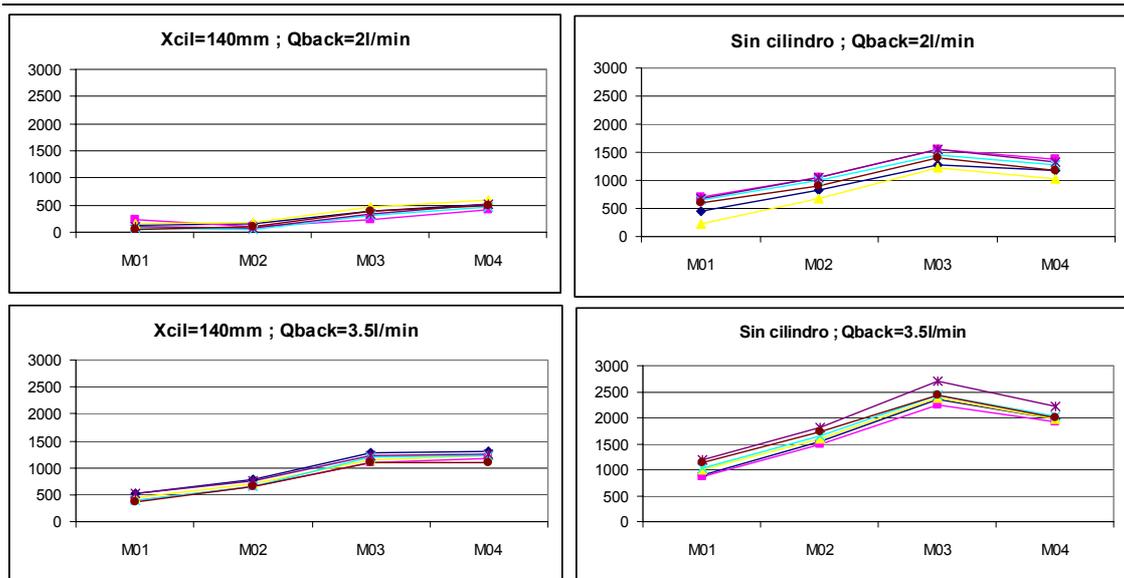


Fig. Con.22: Influencia del cilindro empujador y del caudal de ducha de la parte posterior del dentado en la deformación de la pieza (medidas tomadas a la entrada de la enderezadora en µm)

Mientras la especificación de la dureza de la parte posterior del dentado sea de 50 HRC no podremos bajar su caudal de ducha por debajo de 3l/min. Por tanto, nos quedamos con el cilindro empujador a $X_{cil}= 140\text{cm}$ del contacto izquierdo del inductor y con un caudal de la parte posterior del dentado de $Q_{back}= 3.2\text{l/min}$.

2ª Parte: Mejora del programa de enderezado.

El programa utilizado inicialmente, programa 41, tenía las siguientes características.

PROGRAMA 41	
Grietas	3%
Enderezado NOK	5%
Tiempo ciclo	70 s

Más importante aun que el alto tiempo de ciclo era la aparición de grietas y roturas en la cremallera debida al enderezado, por el peligro que conlleva que llegue alguna de estas piezas al montaje de la dirección completa. La mayoría de estas grietas se producían en las primeras fases del enderezado (en el valle de los dientes y bajo los puntos de golpeo), las cuales servían solamente para disminuir un poco la deformación con la que llegaban las piezas antes de pasar a un enderezado mas exigente. Esto daba a entender que la pieza no admitía la deformación suficiente para ser enderezada; esta es otra razón por la que también se perseguía el disminuir la deformación de la pieza en el tratamiento térmico.

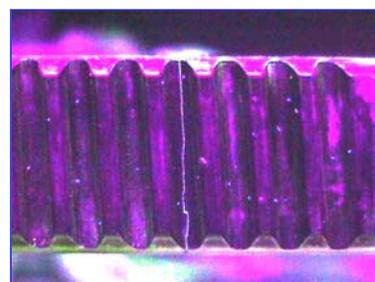


Fig. Con.23: grieta, producida en la enderezadora, a lo largo del valle entre dos dientes

Coincidiendo con la instalación del cilindro empujador se modifica el programa 41 dando lugar al programa 43. Las modificaciones más importantes son:

- Se deja mas separación entre los apoyos del dentado y se golpea por primera vez en el centro del mismo para la reducción de la deformación inicial (en la deformación de la pieza la caña permanece prácticamente recta y es el dentado el que se dobla, por tanto se golpea la primera vez en el centro del mismo teniendo los apoyos en los extremos del dentado).

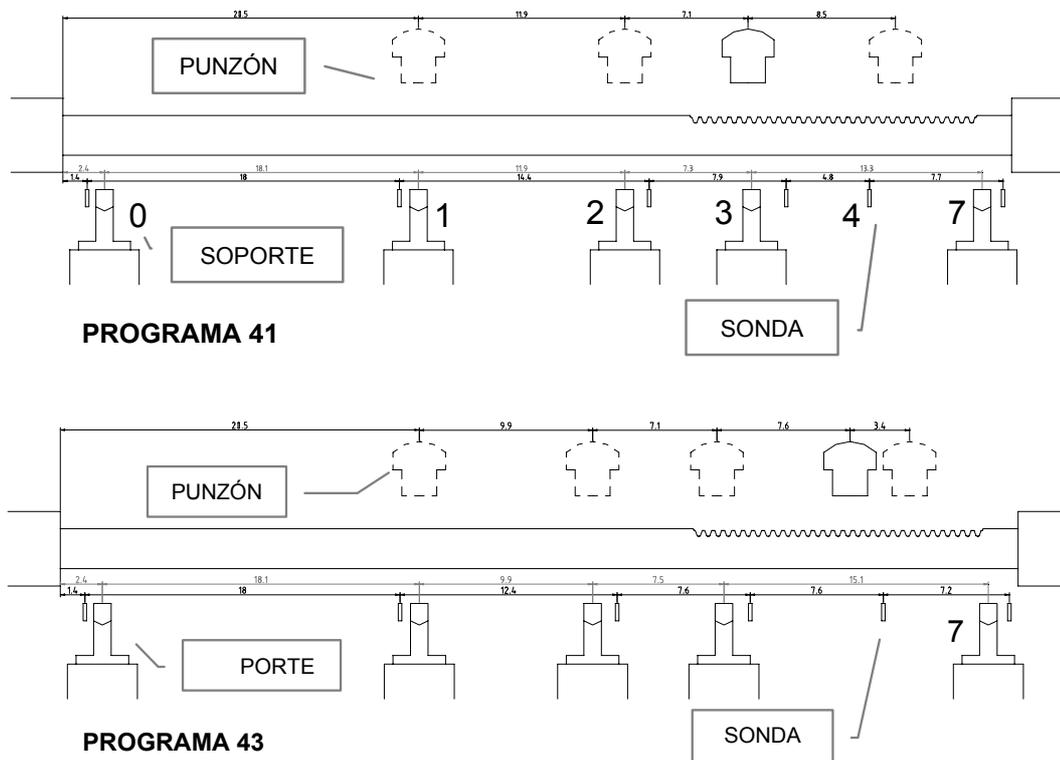
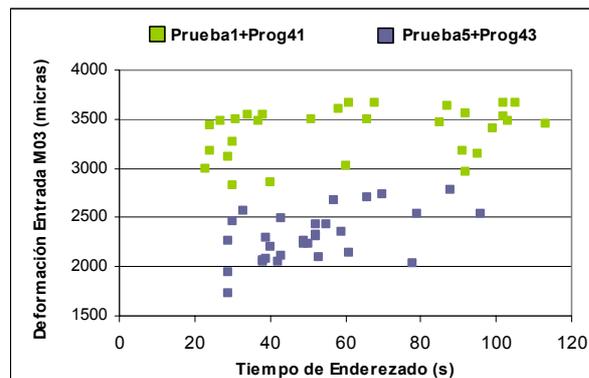


Fig. Con.24: Soportes y puntos de golpes de los programas de enderezado 41 y 43

Las características de este programa 43 fueron en sus comienzos:

PROGRAMA 43	
Grietas	1%
Enderezado NOK	1,5%
Tiempo ciclo	60 s

Fig. Con.26: Deformación a la entrada de la enderezadora frente al tiempo de enderezado (Prueba 1: sin cilindro empujador y prog.41; Prueba 5: con cilindro empujador y prog.43)



Un programa de enderezado es específico para cada tipo de pieza. Conforme se consigue ir disminuyendo mas todavía la deformación de la pieza el programa se va optimizando, para conseguir los mejores resultados, variando levemente algunos parámetros de distintas fases como pueden ser las flechas bases, los incrementos de las mismas, las tolerancias de enderezado, etc. hasta llegar a obtener un tiempo medio de ciclo de unos 35s (con todas las mejoras para deformación de la pieza ya realizadas).

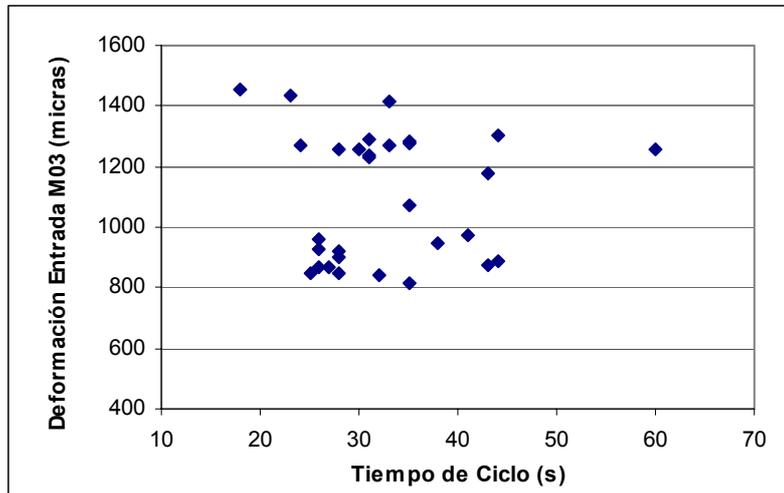


Fig. Con.27: Deformación de las piezas a la entrada de la enderezadora frente al tiempo de enderezado

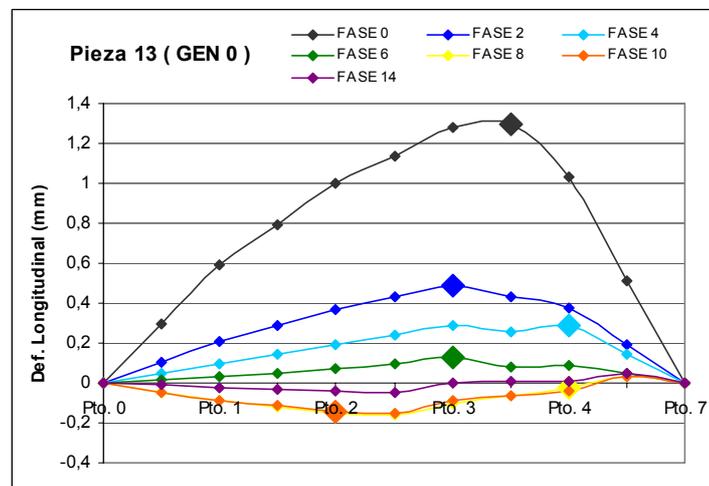
Una vez que se ha conseguido disminuir la deformación de la pieza sigue apareciendo esporádicamente alguna grieta, pero en esta ocasión siempre se producen al final del ciclo de enderezado (fases de golpeo para el afino de la rectitud), y en los primeros dientes del dentado.



Fig. Con.28: Situación de grieta al comienzo del dentado

La deformación que adquiere la pieza después de cada fase de golpeo del enderezado es la siguiente:

Fig. Con.29: Deformación Longitudinal de la pieza después de cada fase de golpeo de la enderezadora



La pieza va disminuyendo su deformación hasta que llega a la fase 08, en la que se rebasa la línea cero, y alcanza una deformación contraria a la que traía. Se puede apreciar como, además, el punto mas bajo de la pieza es uno situado entre el 2 y el 3, que corresponde al comienzo del dentado y que es donde justamente se produce la grieta.

Fase 08 M09 Sonda 237	Ps= 16,54 mm	Pd= 13,09 mm	Flecha base= 3,2 mm
Tolerancia de enderezado 80	Nivel 1 150	Nivel 2 200	Nivel 3 300
Incremento base 0,1 mm	Nivel 1 0,15	Nivel 2 0,2	Nivel 3 0,3

Las posibles soluciones que se optan para solventar esto son las siguientes:

- Aumento de la tolerancia de enderezado a TE= 120µm: el tiempo medio de ciclo que se obtiene es de 32.1s.
- Cambiar la medida M09 (medida 237) por la M03 (medida 037): lo que se hace es cambiar una la referencia de la medida, la 2 por la 0. El tiempo medio de ciclo es de 32.7s.

La solución adoptada es la segunda, debido a:

- La referencia 0 es fija, mientras que la 2 va bajando conforme se va golpeando en el punto 3, de ahí que la pieza sea golpeada tantas veces y se pase a deformación contraria al intentar alinear los puntos 2, 3 y 7.

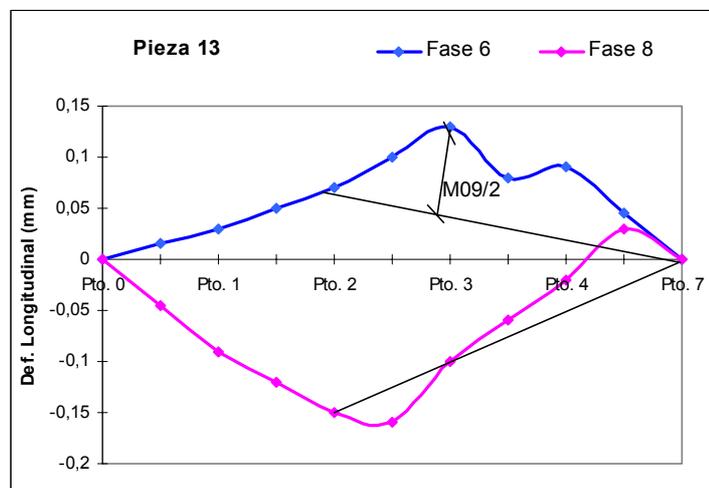
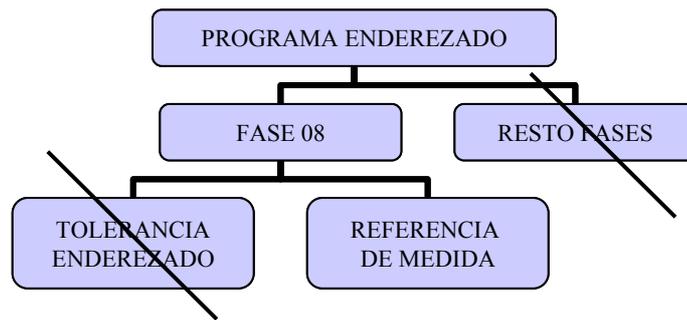


Fig. Con.30: Deformación Longitudinal de la pieza después de las fases 6 y 8.

- De esta forma se intenta enderezar la pieza entera (alinear los puntos 037), no solo una parte de ella (alinear los puntos 237), luego la posibilidad de acabar el ciclo en esta fase es mayor.



Con esta solución la pieza ya no pasa a negativo en esta fase, y si lo hace es en menor medida que antes, ya que el punto 3 se quedará siempre en la parte positiva, y si el 2 pasa a negativo será por muy poco. También resulta que ahora el punto mas bajo de la pieza es el 2, que pertenece a la caña, no como antes, que era uno perteneciente al principio del dentado. Por tanto, la posibilidad de aparición de grietas es bastante menor.

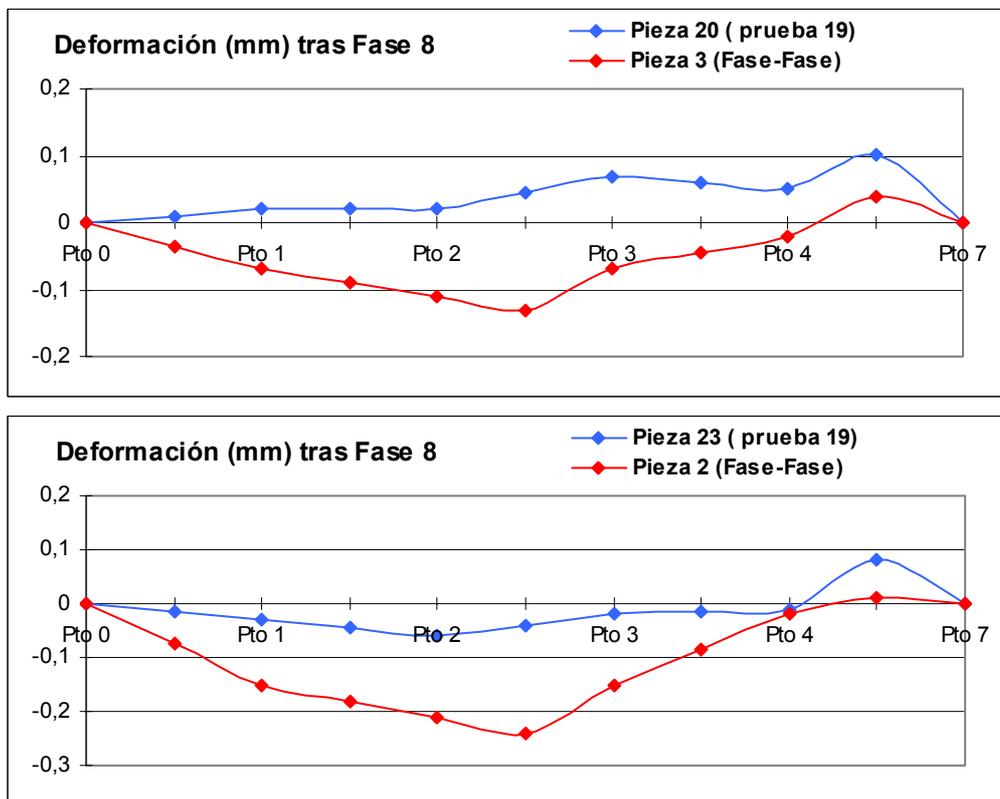
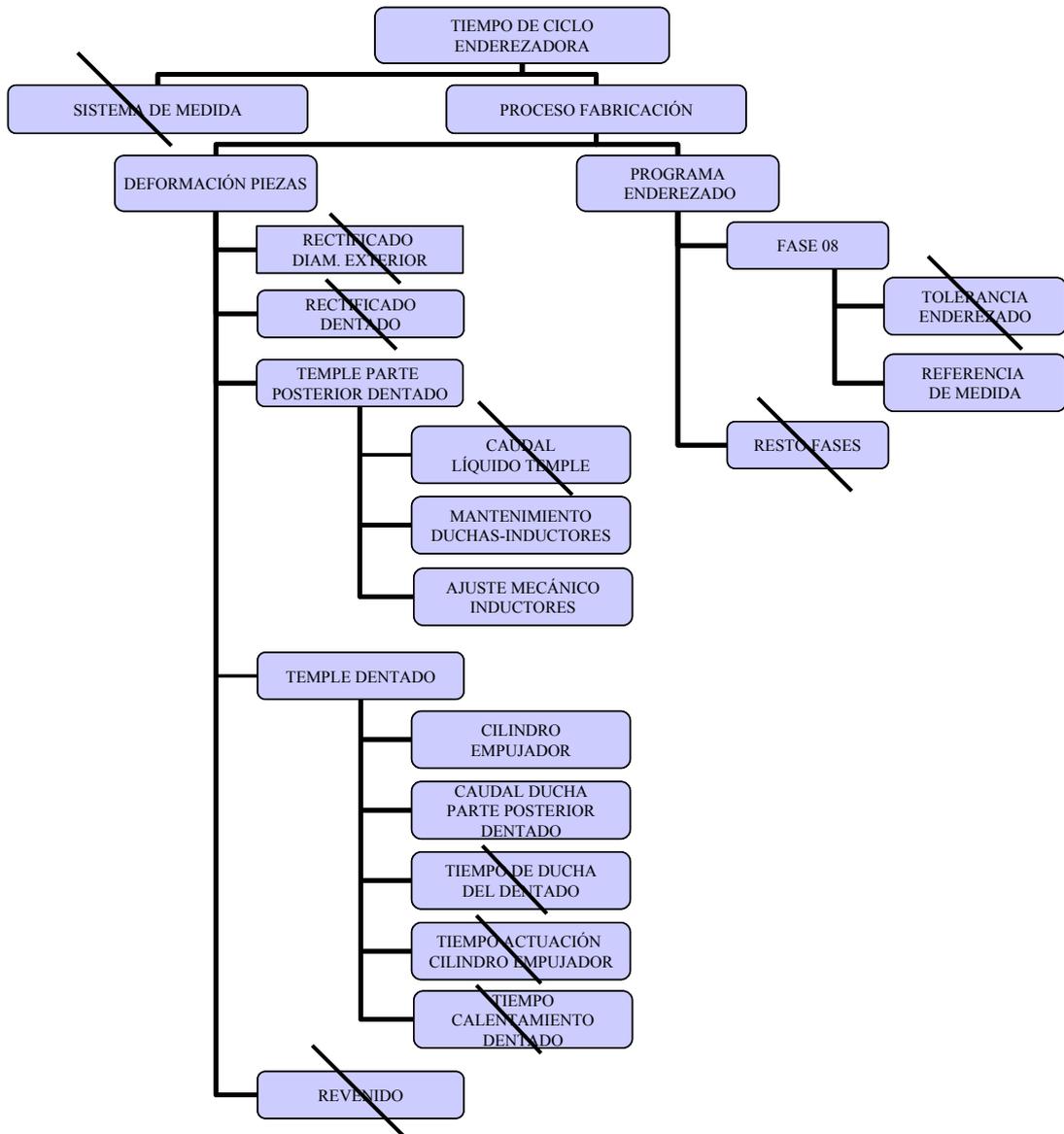


Fig. Con.31: Deformación longitudinal de la pieza tras la fase 8. Comparación entre antes y después de la modificación de la referencia de la medida M09

El árbol de solución completo queda pues, de la siguiente forma:



Comparación entre situación inicial y final.

Tras las medidas adoptadas para la mejora de la deformación de la pieza en los procesos de temple y las mejoras realizadas en el programa de enderezado, se obtiene que:

- Deformación de la pieza:

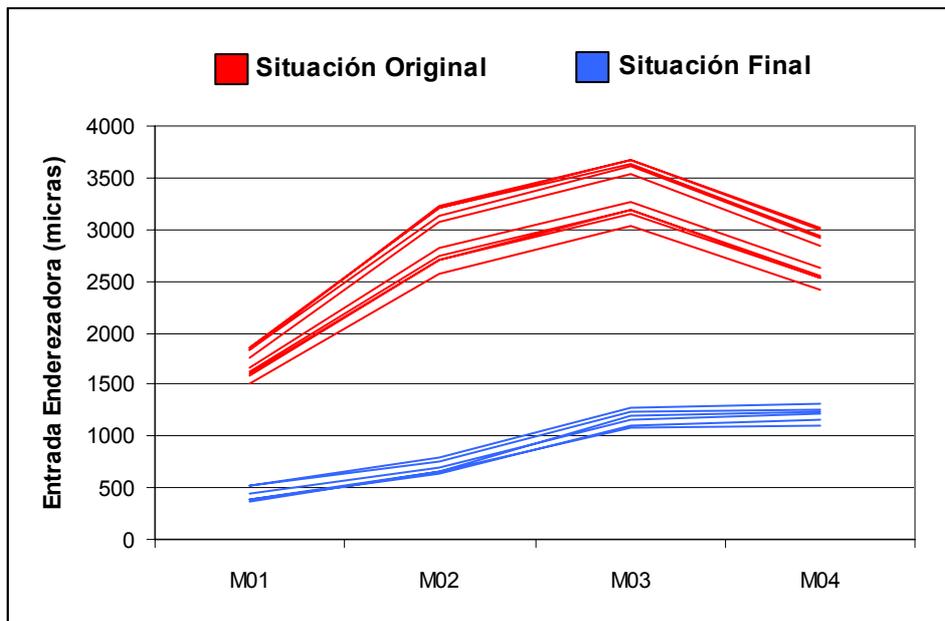


Fig. Con.32: Comparación de la deformación de la pieza al comienzo y al final del proyecto

Se aprecia la desaparición de las dos familias de piezas y la importante disminución de la deformación resultante tras el tratamiento térmico.

- Tiempo de enderezado:

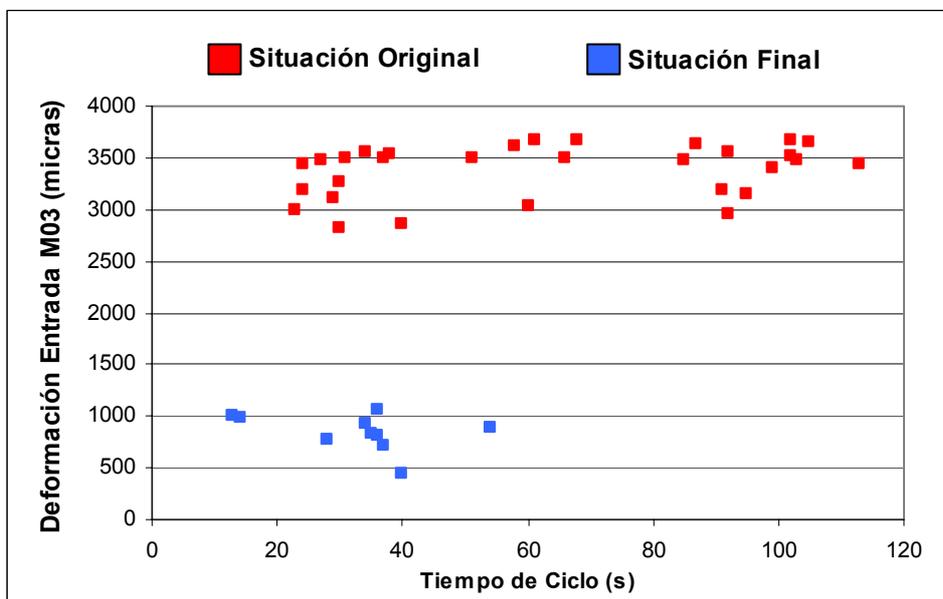


Fig. Con.33: Comparación entre los tiempos de enderezado al comienzo y al final del proyecto.

El tiempo medio de ciclo de la enderezadora ha pasado de 70s a 35s.

- Evolución del número de grietas en el enderezado:

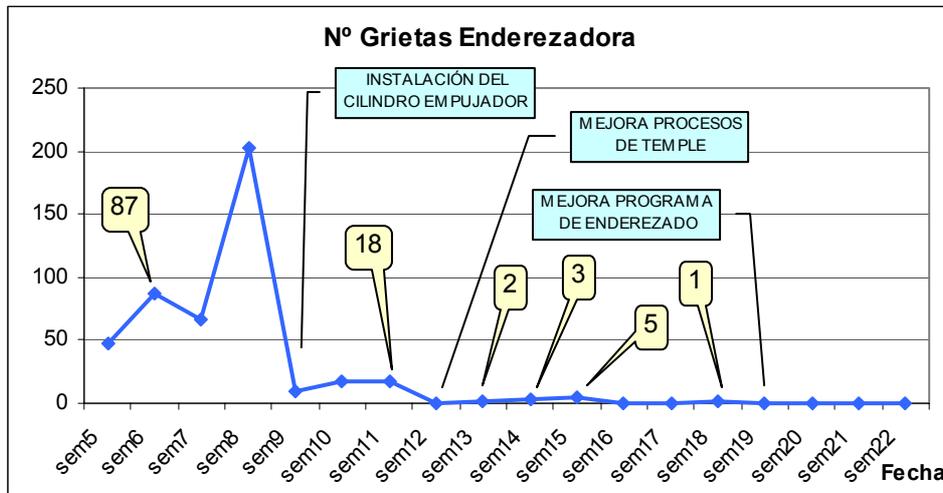


Fig. Con.34: Evolución semanal del número de grietas producidas por la enderezadora.

El número de grietas se ha disminuido conforme se ha ido reduciendo la deformación de la pieza, primero en gran medida tras la instalación del cilindro empujador y después un poco mas cuando se adoptaron el resto de medidas en las inductoras, para terminar desapareciendo por completo tras la corrección de la fase 08 del programa de enderezado.