

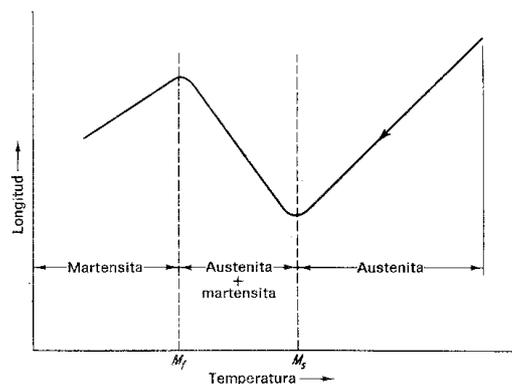
8.1. DEFORMACIÓN EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO.

8.1.DEFORMACIÓN EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO.

Las tensiones residuales son las tensiones que quedan en una pieza al desaparecer las fuerzas que actúan sobre ella. Éstas están originadas siempre por una deformación no uniforme. En el caso de los tratamientos térmicos, las causas de esta deformación no uniforme pueden ser un gradiente de temperatura, un cambio de fase, o lo que sucede normalmente, una combinación de ambos factores durante el enfriamiento.

- Influencia del gradiente de temperaturas:** durante el temple, la superficie de la pieza se enfría con mayor rapidez que el interior. Esto origina un gradiente de temperatura en la sección recta de la pieza, o una diferencia de temperaturas entre la superficie y el centro. Al cabo de un tiempo, la superficie, cuya temperatura es menor que la del interior, se ha contraído mucho más que éste. Sin embargo, como ambas zonas, la periférica y la del interior, están íntimamente unidas, y la segunda tiene más masa que la primera, ésta no podrá contraerse la misma cantidad que si lo hiciera libremente. Las capas exteriores quedarán, por tanto, alargadas y sometidas a una tracción, mientras que las interiores, por el contrario, estarán sometidas a compresión. Esta tensión de tracción a la que está sometida la superficie puede alcanzar valores muy elevados, que si supera la carga de rotura del material aparecen grietas. Si la tensión es inferior al límite de elasticidad práctico del acero, esta será soportada elásticamente. Cuando toda la pieza se encuentre a la temperatura ambiente, $\Delta T = 0$ y, por tanto, al no existir tensiones de origen térmico, la pieza no sufrirá ninguna deformación. Por el contrario, si la tensión es superior al límite de elasticidad práctico, la capa superficial se deformará plásticamente ocasionándose un alargamiento permanente. A la temperatura ambiente la zona periférica tendrá unas tensiones residuales de compresión, mientras que la zona interior estará sometida a unas tensiones residuales de tracción. Ello hace que si la pieza originalmente tenía una forma cilíndrica, presente ahora una forma abarrilada.
- Influencia del cambio de fase:** la austenita, la cual cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas, presenta una estructura más compacta que cualquiera de los constituyentes en que se transforma. Por tanto, cuando la austenita se transforma en perlita, bainita o martensita, esta transformación va acompañada de un aumento de volumen. La transformación martensítica es la que da lugar a un aumento de volumen mayor, el cual es del orden de un 4.6% aproximadamente, siendo tanto mayor cuanto menor es la temperatura M_s .

Representación esquemática de los cambios dimensionales que tiene lugar en la transformación martensítica.



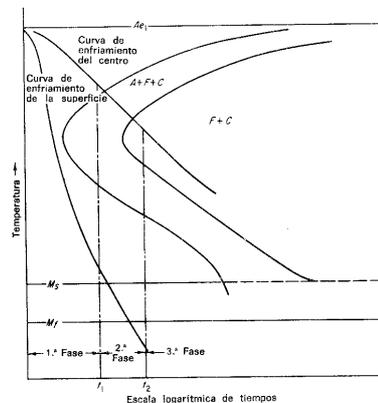
A temperaturas elevadas, la pieza se encuentra en estado austenítico, y conforme disminuye la temperatura la austenita se contrae normalmente hasta alcanzar la temperatura M_s . Entre las temperaturas M_s y M_f , la austenita se transforma en martensita con el consiguiente aumento de la longitud. Al descender la temperatura por debajo de M_f , la martensita se contrae normalmente.

Consideremos, ahora, la influencia combinada de ambos factores para el doble temple superficial que sufre la cremallera de dirección.

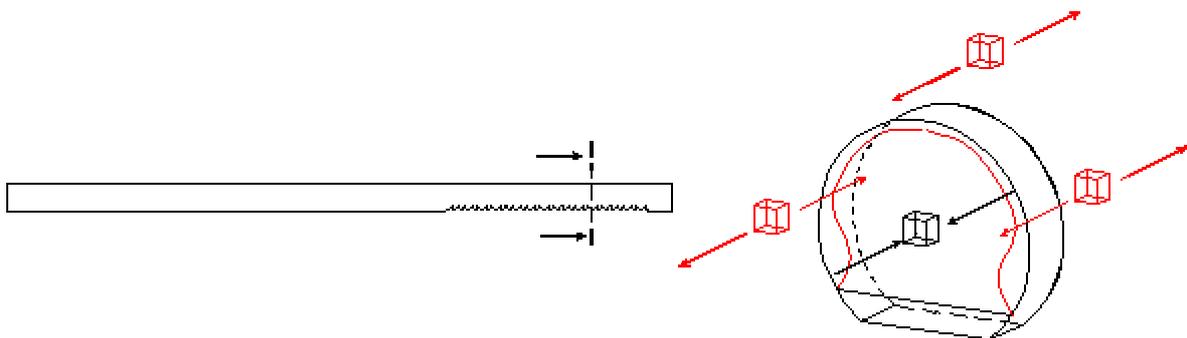
Temple de la parte posterior del dentado.

En el gráfico podemos ver las curvas de enfriamiento correspondientes al centro y a la superficie de un acero templado superficialmente, colocadas sobre un diagrama T-I.

Temple superficial. Curvas de enfriamiento del centro y de la superficie colocadas sobre un diagrama T-I.

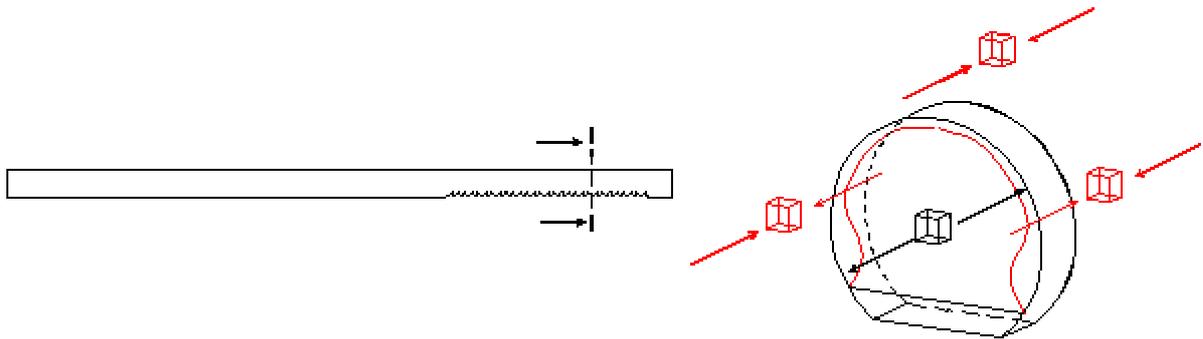


1ª Fase: en la primera fase del enfriamiento, hasta el instante t_1 , las tensiones presentes se deben al gradiente de temperatura. La superficie calentada, al no poderse contraer libremente por impedírselo el centro, se encontrará sometida a una tracción en tanto que éste estará sometido a una compresión.

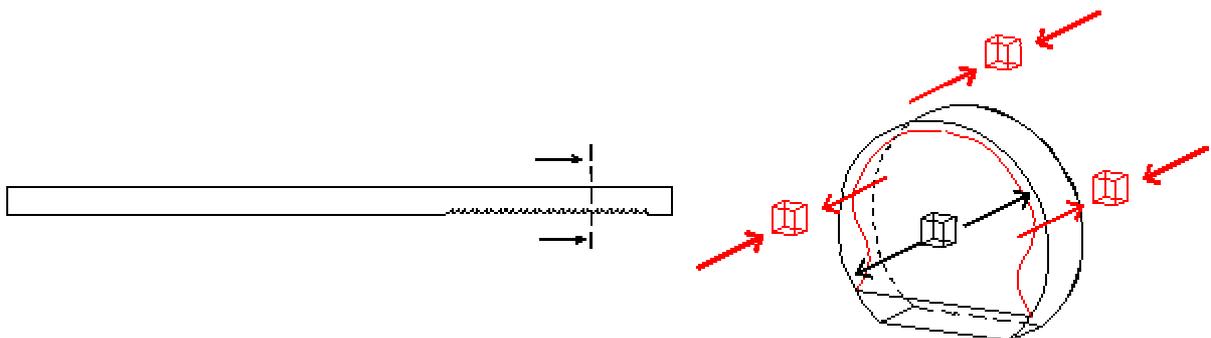


2ª Fase: durante la segunda fase, la cual se verifica en el intervalo comprendido entre t_1 y t_2 , tanto la estructura de la superficie como la del centro se transformarán, obteniéndose en la superficie de la parte posterior del dentado martensita, mientras que en el centro se formará un constituyente mas blando, como la perlita. Toda la pieza se dilata, pero como el aumento de volumen debido a la formación de la martensita es mayor que el resultante de la formación de la perlita, la superficie

tiende a dilatarse mas que el centro. Esto hace que el dentado y el centro quede a tracción mientras que la superficie templada quedará comprimida.



3ª Fase: al cabo del tiempo t_2 el centro y la parte del dentado, al enfriarse desde la temperatura de transformación a la temperatura ambiente se contraerá. Ahora bien, como la estructura de la superficie de la parte posterior del dentado es martensítica y alcanza la temperatura ambiente mucho antes que el centro, este no podrá contraerse en la misma medida en que lo haría libremente, lo cual da lugar a la existencia en la zona del dentado de tensiones de tracción todavía mas elevadas



La deformación final que adquiere la pieza en este temple es la siguiente:

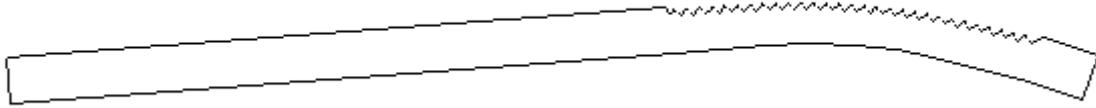


Temple del dentado.

Como se ha dicho, la pieza llega a la inductora del temple del dentado con una deformación de la forma de la figura anterior.

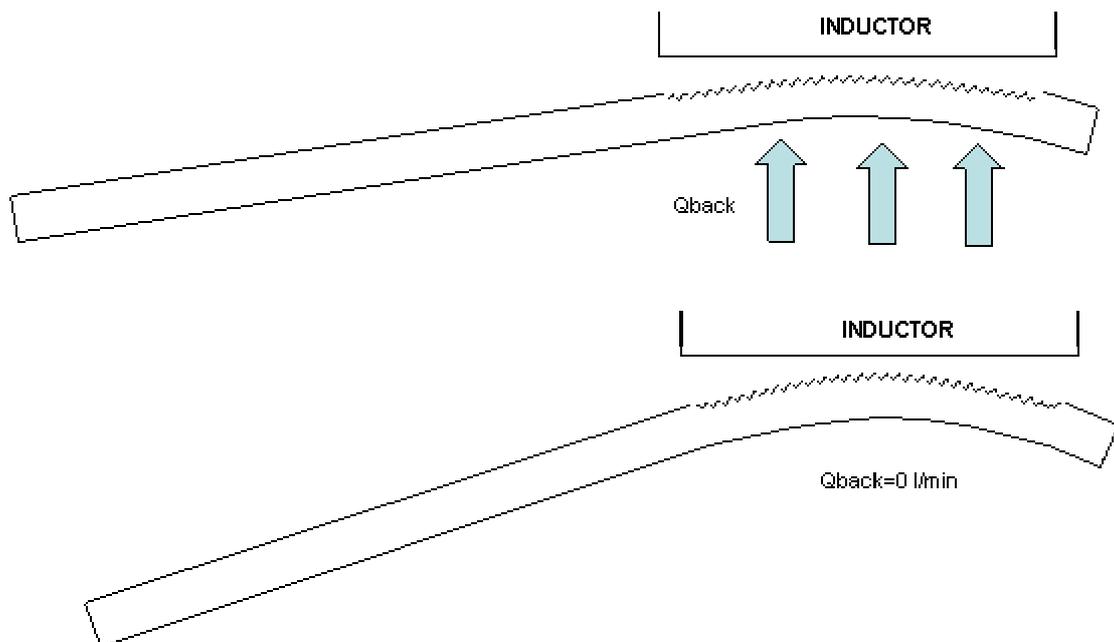
A continuación se somete a un calentamiento mediante dos mecanismos, inducción y conducción. Debido sobretodo al mecanismo de conducción y a que se calienta al mismo tiempo una gran parte de la pieza (todo el dentado), la energía

aportada es muy grande, dando lugar a una gran dilatación en la parte del dentado que consigue deformar la pieza en sentido contrario a como llegó:



El grado de deformación en la pieza que se alcance debido a esta dilatación depende de la dureza de la zona posterior del dentado (capa templada en la operación anterior), y esta dureza es función del calor que le llegue a dicha capa, y esto depende del caudal de la ducha del back empleado.

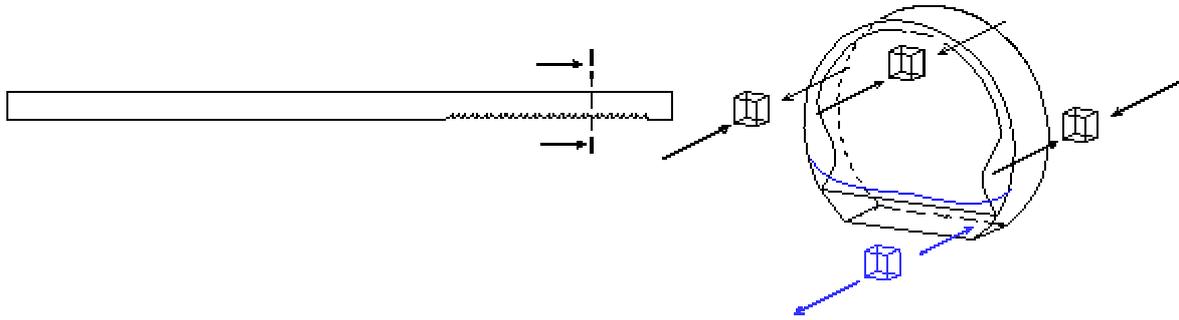
Así a menor caudal en la ducha de la parte posterior del dentado le llegará mas calor a la capa templada y su dureza se verá disminuida, oponiéndose en menor medida a la deformación de la pieza que si la capa estuviera bien refrigerada y con su dureza intacta.



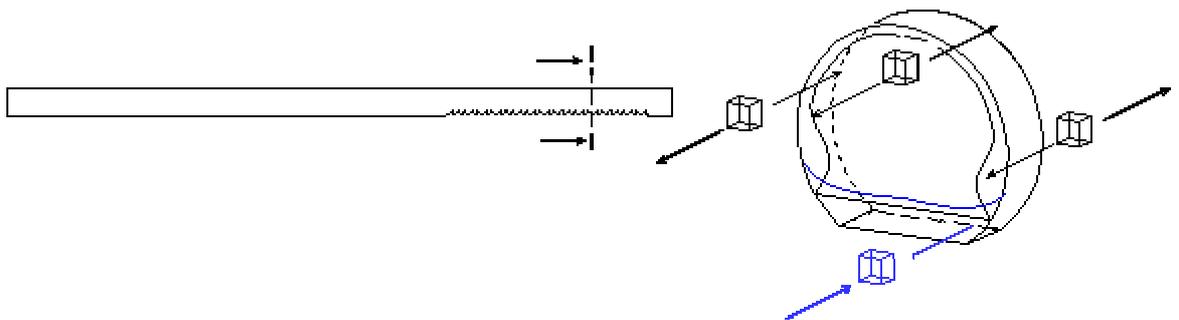
Analicemos ahora como tiene lugar el enfriamiento de la pieza (temple): como es un temple superficial, las curvas de enfriamiento serán similares a la del temple anterior para la zona que se va a templar y para el resto de la pieza.

1ª Fase del enfriamiento: las tensiones existentes en esta fase se deben al gradiente de temperaturas entre la superficie del dentado y el resto de la pieza (núcleo y parte posterior del dentado). La zona del dentado, al no poderse contraer libremente por impedírselo el centro se encontrará sometida a una tracción, mientras que la zona inferior de la pieza estará a compresión. Hay que señalar que la contracción que tiene lugar en el dentado es muy grande porque toda la sección de la pieza ha sido sometida a

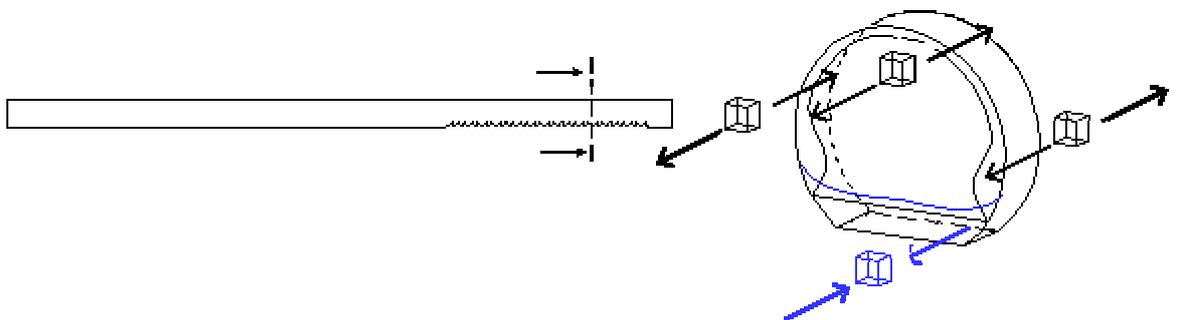
un gran calentamiento, luego el gradiente de temperaturas es muy elevado. Las tensiones a las que la pieza se encuentra se encuentra sometida en esta fase son:



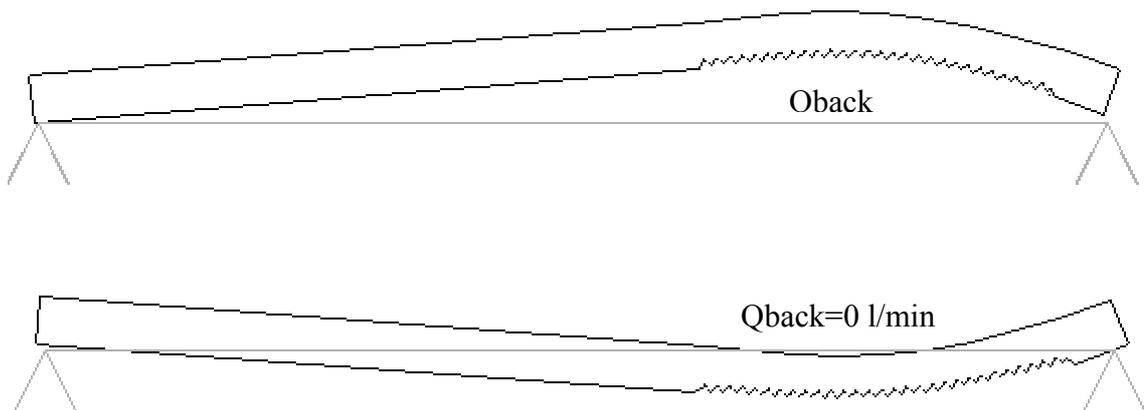
2ª Fase del enfriamiento: tiene lugar en el dentado la transformación a martensita, mientras que el núcleo lo hace a perlita. El aumento de volumen es mayor en el dentado que en el centro, luego en esta fase el estado tensional actuante es de compresión en el dentado y de tracción en la zona inferior:



3ª Fase del enfriamiento: el zona centro de la pieza tenderá a contraerse, pero la capa ya martensítica del dentado no lo permitirá como si fuese libremente, luego el dentado se someterá a una mayor compresión y la zona inferior de la pieza a una tracción.



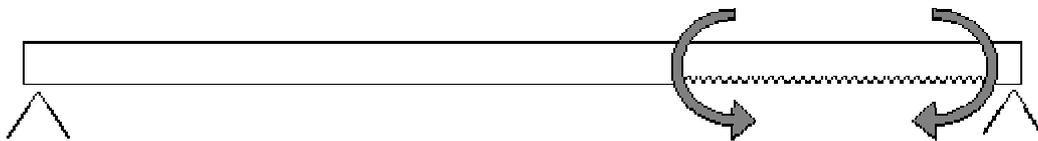
Dependiendo del caudal de la zona back las piezas quedarán tras el temple con la siguiente deformación.



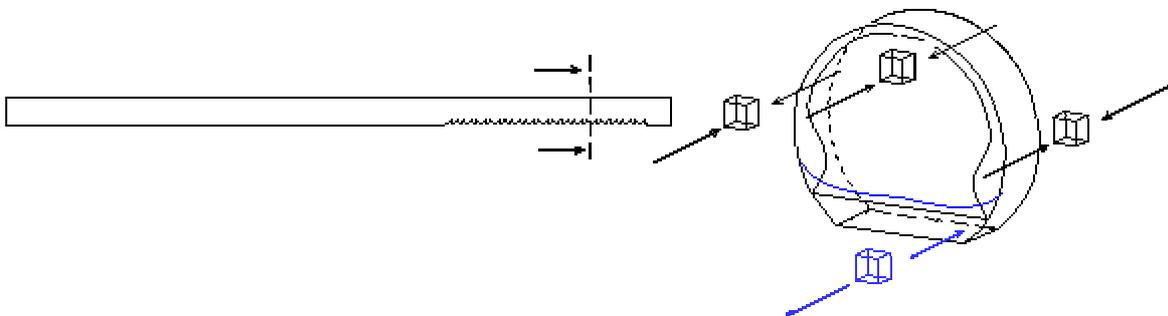
Deformación en el revenido.

Mediante el revenido de las piezas se realiza un alivio de las tensiones residuales, que quedan en ellas, tras el proceso de temple. Por consiguiente, las tensiones tienden a desaparecer y las piezas a relajarse.

Según se ha podido comprobar en las pruebas realizadas, tanto con caudal en la zona de la parte posterior del dentado (en el temple del dentado) como sin él, el sentido en el que se deforma la pieza en el revenido es siempre el mismo:



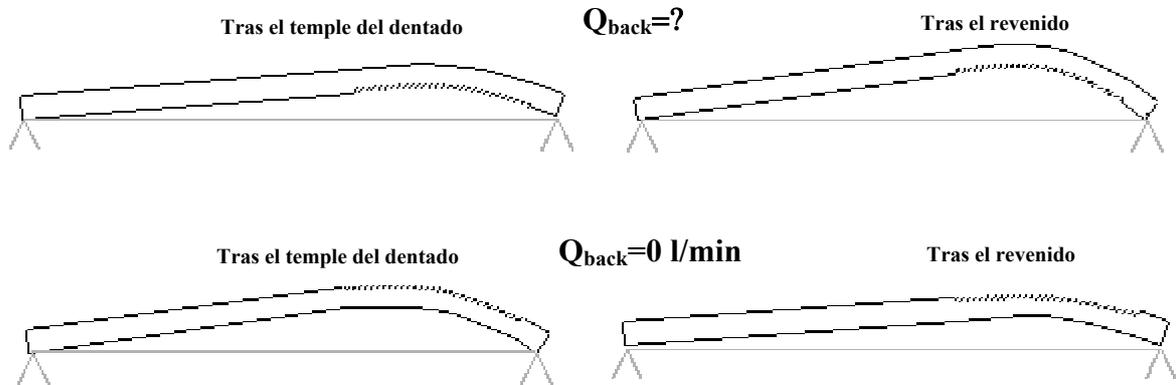
Esto quiere decir en ambos casos, tras el temple del dentado, éste queda a tracción mientras que la parte posterior queda a compresión, aunque la deformación en uno y otro caso sea al contrario:



Esto implica que es el estado tensional al que se somete la pieza en la primera fase del enfriamiento el predominante, es decir las tensiones que se crean en las fases 2 y 3 no son capaces de contrarrestar las de la fase 1. Por tanto, es la fase de la contracción del dentado la predominante en el temple. Que se alcance una deformación

(+) o (-) final tras el temple, debida a esta contracción, depende de la deformación adquirida en el calentamiento de la pieza y ya vimos que esto dependía del caudal del back.

Por tanto, la deformación:



Se puede dar el caso en que la pieza, para caudales bajos del backside ($Q_{back}=0.5-1 \text{ l/min}$) salga con deformación negativa del temple del dentado y tras el revenido pase a deformación positiva.

