

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Optimización de procesos de trefilado con algoritmos metaheurísticos

Autor: Carlos Juez Barrero

Tutor: Francisco Javier Doblás Charneco

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Optimización de procesos de trefilado con algoritmos metaheurísticos

Autor:

Carlos Juez Barrero

Tutor:

Francisco Javier Doblas Charneco

Profesor Contratado Doctor

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Optimización de procesos de trefilado con algoritmos metaheurísticos

Autor: Carlos Juez Barrero
Tutor: Francisco Javier Doblaz Charneco

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

*A María,
por despertar en mí la curiosidad
que me ha traído hasta aquí.*

Agradecimientos

El camino que me ha llevado a través de este grado ha sido largo y nada sencillo. Muchas horas de esfuerzo y entrega para exprimir cada momento que he vivido en esta universidad. De ella me llevo los conocimientos, pero sobre todo una gran cantidad de experiencias que me han hecho crecer como estudiante, como profesional y sobre todo como persona.

Me gustaría agradecer a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería por permitirme desarrollar mis capacidades como nunca habría esperado, y darme las facilidades para formar mi futuro. También a mis compañeros, por acompañarme y estar siempre ahí para ayudarme en todo lo que haya necesitado.

Agradecer especialmente a mi tutor para este proyecto la paciencia y la dedicación que me ha dedicado. Trabajar juntos ha sido muy fácil, y sus consejos y su guía han sido lo que me ha llevado a poder realizar este trabajo.

Dar las gracias a mi madre, mi padre y mi hermano porque sin ellos nada hubiera tenido sentido. En general, agradecer a toda mi familia por el cariño que me ha dado, que ha sido lo que me ha empujado a seguir hacia adelante y que nunca podré agradecer suficiente.

*Carlos Juez Barrero
Sevilla, 2023*

Resumen

El trefilado es el método más extendido para la fabricación de alambres de pequeño diámetro. Se hace pasar en frío una preforma de diámetro mayor a través de una máquina de estirado, realizando tantas pasadas como sea necesario para alcanzar la sección final deseada. Es un proceso sencillo, rápido y automático, que además mejora las propiedades mecánicas del material.

En este proyecto, se busca implementar un algoritmo que nos permita resolver el problema de optimización del trefilado, encontrando los diámetros y tensiones que minimizan el número de pasadas requerido para alcanzar una reducción de diámetro dada. Además, se limitará el valor de las tensiones inducidas en el material para asegurar su integridad. Se utilizará un algoritmo de búsqueda aleatoria, conocido como Recocido Simulado.

Con el algoritmo diseñado, se resolverán varios problemas de trefilado para comprobar que las soluciones obtenidas son acertadas y comparar los resultados. Además, buscando comprender mejor el proceso de optimización, se analizarán la secuencia del algoritmo y las variables utilizadas.

Abstract

Multi-pass cold drawing is the most extended method for small diameter wire manufacturing. The starting stock, which has a larger diameter, is drawn, in a cold method, through different dies that decrease its size, applying as many passes as are needed to reach the desired final section. It is a simple, fast, automatic method, which also improves the mechanical properties of the material.

In this project, an optimization algorithm is searched in order to solve the problem of designing a multi-pass drawing process, finding the diameters and stresses that minimizes the number of passes through the dies needed to reach a certain area reduction. Furthermore, a limited value of the stresses guarantees the safe operation of the material. The optimization method lays in a random search algorithm known as Simulated Annealing.

Once the algorithm is implemented, some drawing problems are solved to check the solutions obtained, comparing the results. The steps followed by the algorithm and the variables used are also analyzed for a better understanding of the optimization method.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	V
<i>Abstract</i>	VII
<i>Índice Abreviado</i>	IX
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
2 Proceso de trefilado de alambre	3
2.1 Conformado en frío	3
2.2 Proceso de fabricación	4
2.3 Equipo e instalaciones	5
2.4 Materiales	5
3 Definición del problema	7
3.1 Desarrollo matemático	7
4 Método de optimización	13
4.1 Métodos metaheurísticos: técnica del recocido simulado (SA)	13
4.2 Recocido simulado	13
5 Empleo del algoritmo de optimización	17
5.1 Resultados	17
5.2 Resultados con factor de no homogeneidad	20
5.3 Aleatoriedad del método	22
6 Conclusiones y trabajos futuros	27
Apéndice A Códigos MATLAB	29
A.1 Programa principal	29
A.2 Programa SA	30
A.3 Programa fun	31
A.4 Programa funsd	32
A.5 Programa randomiz	33
A.6 Función SA no aleatoriedad	34
<i>Índice de Figuras</i>	35
<i>Índice de Tablas</i>	37
<i>Índice de Códigos</i>	39
<i>Bibliografía</i>	41

Índice

<i>Resumen</i>	V
<i>Abstract</i>	VII
<i>Índice Abreviado</i>	IX
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
2 Proceso de trefilado de alambre	3
2.1 Conformado en frío	3
2.2 Proceso de fabricación	4
2.3 Equipo e instalaciones	5
2.4 Materiales	5
3 Definición del problema	7
3.1 Desarrollo matemático	7
3.1.1 Ángulo de la hilera	9
3.1.2 Factor de no homogeneidad de la deformación	9
3.1.3 Número mínimo de pasadas	9
3.1.4 Función objetivo	11
4 Método de optimización	13
4.1 Métodos metaheurísticos: técnica del recocido simulado (SA)	13
4.2 Recocido simulado	13
4.2.1 Variable de decisión	13
4.2.2 Temperatura	14
4.2.3 Generación del nuevo vector de diámetros	14
4.2.4 Algoritmo SA	15
4.2.5 Algoritmo de optimización	15
5 Empleo del algoritmo de optimización	17
5.1 Resultados	17
5.1.1 Comprobación del número mínimo de pasadas	19
5.2 Resultados con factor de no homogeneidad	20
5.3 Aleatoriedad del método	22
5.3.1 Análisis de la función objetivo	22
5.3.2 Aceptación no aleatoria del óptimo	24
5.3.3 Aceptación no aleatoria del óptimo. Factor de no homogeneidad	24
6 Conclusiones y trabajos futuros	27
Apéndice A Códigos MATLAB	29

A.1	Programa principal	29
A.2	Programa SA	30
A.3	Programa fun	31
	A.3.1 Programa funphi	32
A.4	Programa funsd	32
	A.4.1 Programa funsdphi	32
A.5	Programa randomiz	33
A.6	Función SA no aleatoriedad	34
	<i>Índice de Figuras</i>	35
	<i>Índice de Tablas</i>	37
	<i>Índice de Códigos</i>	39
	<i>Bibliografía</i>	41

Notación

d	Diámetro del alambre
d_0	Diámetro inicial
d_f	Diámetro final
r_0	Radio inicial
r_f	Radio final
i	Índice de pasada
d_i	Diámetro inicial en la pasada i
d_{ini}	Vector de diámetros inicial para el algoritmo
N	Número de pasadas
N_{inf}	Cota mínima del número de pasadas
ε_i	Deformación plástica de la pasada i
ε_i^c	Deformación plástica acumulada de la pasada i
ε_{max}	Deformación máxima
σ_i	Tensión de estirado de la pasada i
C	Coefficiente de resistencia
n	Exponente de endurecimiento por deformación
$\sigma_{ave,i}$	Tensión de fluencia promedio de la pasada i
σ_{ave}	Tensión media del proceso
σ_{max}	Tensión máxima del proceso
σ_{adm}	Tensión máxima admisible por el material
μ	Coefficiente de fricción
α	Ángulo de la hilera
ϕ	Factor de tensiones debido a la no homogeneidad
f_{obj}	Función objetivo
Δf_{obj}	Incremento de la función objetivo
T	Temperatura
T_0	Temperatura inicial
T_{min}	Temperatura mínima
β	Pendiente de la curva de temperatura
γ	Tasa de enfriamiento
CV	Coefficiente de variación
ΔA_i	Reducción de área de la pasada i
t	Tiempo del algoritmo sin aleatoriedad
t_{rand}	Tiempo del algoritmo con aleatoriedad
\ln	Función logaritmo neperiano
$cot g$	Función cotangente

1 Introducción

A la hora de desarrollar un proceso de fabricación, es muy importante conocer con profundidad todos los factores que condicionan su efectividad. El tipo de materiales a utilizar y sus propiedades, las condiciones de ejecución, las restricciones de operación, el objetivo del diseño de la producción, etc. En particular, el diseño previo de un proceso de fabricación conlleva el estudio y modelado de los factores que influyen en él. Matemáticamente, es necesario reconocer los parámetros que hacen posible o no llevarlo a cabo, ya que un pobre análisis de las circunstancias que rodean al diseño puede llevar a un uso ineficiente de maquinaria y recursos, y a la no consecución de los objetivos de fabricación.

Este proyecto trata sobre el proceso del trefilado de alambre, la producción de hilos de pequeño diámetro a partir de otros con sección mayor mediante el estirado del material. En el trefilado es muy común necesitar varias pasadas a través de las hileras para alcanzar el diámetro final deseado. Sería muy valioso conocer el número de pasadas mínimo que se necesita para pasar de un tamaño a otro, y así ayudarnos a reducir los gastos de producción y trabajar de la forma más eficiente posible.

Ésta será la finalidad del proyecto: implementar un método sencillo que estime el número de veces a estirar un alambre para reducir su sección. Teniendo en cuenta la gran cantidad de elementos y parámetros que condicionan el proceso, no es sencillo conseguir un modelo simple que permita alcanzar conclusiones valiosas. El modelado matemático determina las relaciones entre las diferentes variables implicadas. Diámetros, tensiones, deformaciones confluirán en un modelo que pueda aportar información sobre los diámetros entre cada pasada y los esfuerzos soportados. Una vez desarrolladas las expresiones matemáticas que definen el problema, se buscará un método de optimización que logre fijar las condiciones de las pasadas necesarias en función de los diámetros inicial y final, siempre considerando una tensión límite que no se podrá sobrepasar para no dañar el material.

Los algoritmos metaheurísticos son procedimientos que realizan una búsqueda directa de la solución. En base a la generación de nuevos candidatos a solución óptima, se busca minimizar una función objetivo, definida de tal manera que represente la variable más crítica y que más perjudique al desarrollo del proceso. En particular, se utilizará un método metaheurístico conocido como recocido simulado (Simulated Annealing), con el que se aprovecha el concepto detrás del tratamiento térmico con el mismo nombre para optimizar el proceso del trefilado. Esto constituirá una herramienta útil en el diseño de la fabricación.

En este proyecto se busca analizar la eficacia de los algoritmos metaheurísticos a la hora de resolver el problema del trefilado, en concreto el método basado en Simulated Annealing. En base a algunas investigaciones previas, se desarrollarán una serie de códigos de MATLAB que implementan el algoritmo de Simulated Annealing para obtener resultados de problemas con diferentes materiales y diámetros iniciales, y poder compararlos. El estudio se centrará en obtener el número de pasadas óptimo y las tensiones generadas en la pieza. Posteriormente, se introducirá el efecto de la no homogeneidad de las deformaciones a lo largo del proceso, para estudiar su influencia. Además, se realizará un análisis sobre la aleatoriedad del método en relación con la función objetivo, especialmente en la generación aleatoria de candidatos en la búsqueda del valor óptimo.

2 Proceso de trefilado de alambre

La producción mediante trefilado es uno de los mecanismos principales de conformado de alambre. Se trata de un proceso de fabricación en frío que nos permite reducir el diámetro de una barra al hacerla pasar por una boca estrecha. Este proceso proporciona no sólo una disminución en el área del alambre sino también un aumento en su longitud y la mejora de algunas de sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, conseguimos aumentar su resistencia a esfuerzos de tracción, aunque disminuye la capacidad a flexión y la tenacidad.

2.1 Conformado en frío

Una de las principales ventajas del trefilado de alambre es la fabricación en frío. Con materiales suficientemente dúctiles, es perfectamente posible trabajar a temperatura ambiente. Esto reduce el tiempo de fabricación, al no necesitar calentar el material, y simplifica el proceso. Además, el trabajo en frío mejora la resistencia y la maquinabilidad.

Los procesos de conformación en frío son aquellos en los que se trabaja el material a temperatura ambiente o menor. En un proceso en caliente, se aprovecha el aumento en la fluidez del metal para deformarlo, dándole la forma y tamaño buscadas utilizando menores presiones. Además, mediante el control de la temperatura de enfriamiento o la deformación se puede conseguir que adopte la estructura interna que mejor convenga para dotarle de las características mecánicas que se deseen. Sin embargo, un proceso en frío no puede utilizar esta técnica. Sin esta fluencia, se necesita aplicar un mayor esfuerzo para producir la deformación.

A pesar de ser trabajo en frío, la acción de las herramientas sobre las piezas eleva su temperatura. Se requieren presiones mucho mayores que en el trabajo en caliente, ya que el metal es mucho más rígido. Las temperaturas elevadas aumentan la elasticidad del material, disminuyendo su módulo elástico, con lo que es más fácil deformar en caliente. Sin embargo, las técnicas de fabricación en caliente son más complejas debido a la dificultad de manipulación por parte de los operarios y al especial cuidado que hay que tener con las tensiones residuales y las diferencias de temperatura.

En el trabajo en frío es importante la ductilidad del material, ya que de esta dependerá su capacidad de soportar los esfuerzos necesarios para su conformación. Un material frágil soportará menores deformaciones, con lo que será más difícil trabajar en ellos.

Una característica importante del conformado en frío es la capacidad de alcanzar tolerancias dimensionales estrechas. En procesos en caliente, hay que tener en cuenta las tensiones provocadas por las diferencias de temperatura, y la dilatación del proceso de enfriado. Sin embargo, al trabajar en frío se puede lograr mayor precisión en cuanto a tolerancias y acabados superficiales. En fabricación de piezas, las pasadas de acabado son siempre en frío, para poder aprovechar esta circunstancia y conseguir las menores tolerancias posibles. También permite conseguir el acabado superficial que se exija.

En general, un proceso de conformado en frío permitirá mejorar las tolerancias exigidas para el material. Además, aumenta su dureza y resistencia, y reduce la complejidad de la maquinaria y los procesos. En

cambio, la necesidad de aplicar tensiones que superen el límite elástico del material provocará una reducción en la ductilidad de éste, además de necesitar fuerzas mayores, lo que conlleva la utilización de máquinas más potentes y caras.

Algunos procesos de conformación por deformación plástica son la laminación, la estampación, el doblado o plegado, la extrusión, el estirado y el trefilado. El estirado es el proceso por el que se estira una barra de metal para reducir su sección. En particular, el trefilado es el nombre que se utiliza para el estirado de alambre, esto es, de barras de pequeña sección.

2.2 Proceso de fabricación

El mecanismo fundamental del trefilado de alambre es el paso del material por un orificio con una salida de diámetro menor al que posee, con el objetivo de reducir su área. En primer lugar, es posible realizar algunos tratamientos térmicos para aumentar la ductilidad del material, especialmente si previamente ha sufrido otros tratamientos de mejora de propiedades que hayan podido favorecer su fragilización. Es común aplicar procesos térmicos previos como el recocido para mejorar su tenacidad, facilitando su conformado en frío y evitando problemas surgidos de la fragilidad del material.

También pueden realizarse tratamientos superficiales de limpieza para eliminar recubrimientos indeseados. Una vez preparado el material, se enrolla en unas bobinas o tambores de tracción. Estas bobinas permiten manejar el material de forma más sencilla y, sobre todo, son las guías que dirigen el alambre hacia la hilera. La hilera, trefila o dado es el orificio con forma cónica por el que el alambre reduce su diámetro al atravesarlo. Introducida la varilla, se conecta el tambor a un motor que tira del material, estirándolo en su paso por la hilera. Con esto, se consigue disminuir el diámetro, además de aumentar su longitud. Al ser un proceso de conformado en frío es clave la ductilidad del material, ya que debe ser suficientemente dúctil para no ser dañado en el proceso.

Normalmente, será necesario realizar el trefilado utilizando varias pasadas del mismo alambre por hileras de diferente diámetro. Al tratarse de un material fino, para conseguir la reducción de diámetro deseada se necesitará una fuerza elevada. Esta tracción inducida en el material debe estar limitada no sólo por la rotura del material sino para que no plastifique más de lo necesario. Una excesiva plastificación puede debilitar el metal, por ejemplo con la aparición de estrías, especialmente tratándose de alambres de pequeño espesor. Por esto, normalmente no se reduce todo el diámetro de la barra en una única pasada de estirado, sino que se hace pasar el material varias veces por diferentes hileras, reduciendo paulatinamente su diámetro en cada pasada. Así, no se necesita una excesiva fuerza de tracción por parte de la trefiladora, sino que se hace en varios esfuerzos. Además, con esto no se necesitará una máquina con una fuerza de trabajo demasiado elevada, bastará con un equipo más pequeño, reduciendo los costes del proceso.

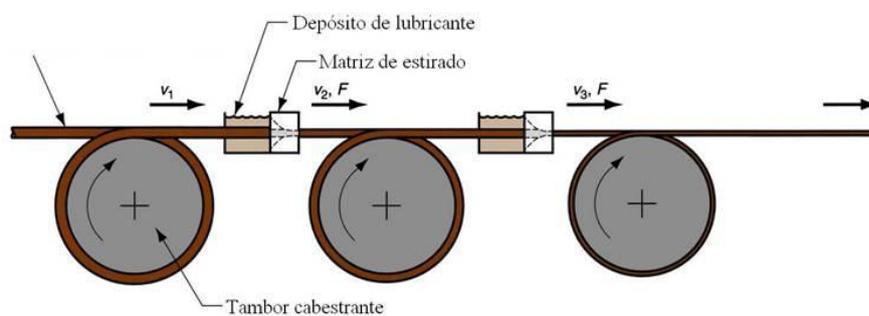


Figura 2.1 Proceso de trefilado.

Es aquí donde radica el problema que busca resolver este trabajo. Con el objetivo de optimizar el trefilado, es necesario conocer cuál sería el número de pasadas óptimo que requiere un material con unas determinadas características, utilizando una máquina con una serie de especificaciones. Como se comprobará durante el desarrollo matemático del proceso, no es una cuestión trivial, ya que existe una fuerte relación entre las

distintas variables, y la definición del problema es ciertamente compleja.

Al finalizar el proceso, en ocasiones se realizan nuevos tratamientos térmicos y superficiales, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del material, y conseguir las tolerancias superficiales exigidas. Además, otros procesos de enderezamiento o doblado pueden realizarse para alcanzar el producto final deseado.

2.3 Equipo e instalaciones

El equipamiento necesario para realizar el trefilado es ciertamente sencillo. En primer lugar, el alambre es enrollado en bobinas que facilitan su manipulación. El extremo se coloca en una mordaza que sujeta el material y ejerce la fuerza necesaria.

El elemento básico del trefilado es la hilera. Ésta tendrá forma cónica, con una entrada del tamaño del material original y una salida con el diámetro menor deseado. Un aspecto a destacar es la lubricación de la hilera. En el paso del alambre a través del orificio, la fricción toma un papel fundamental. Para evitar agrietamientos o ralladuras, es importante el uso de lubricantes que reduzcan la erosión de la superficie del material.

Antes de comenzar el proceso, es muy común utilizar tratamientos superficiales que favorezcan la lubricación. Se utilizan principalmente fosfatos para generar una capa protectora alrededor al alambre que reduzca la fricción. Durante el proceso de estirado, también se utilizan lubricantes, en forma líquida o en polvo, que aumentan la viscosidad del contacto entre la hilera y el alambre, reduciendo el desgaste sufrido.

Una gran ventaja de este proceso es su fácil automatización. Es bastante sencillo conectar la salida de una máquina, que realizará una pasada, con otra que se encargue de la siguiente. Incluso la lubricación puede estar automatizada, con lo que únicamente será necesario preparar las máquinas con la velocidad y fuerza con las que deben trabajar. Con esto, se puede aumentar el ritmo de producción, la calidad y la solidez del proceso.

2.4 Materiales

Los materiales más comunes sobre los que utilizar el trefilado son acero, aluminio y cobre, aunque puede realizarse sobre cualquier metal o aleación dúctil. Como se ha comentado, es fundamental la ductilidad del material a temperatura ambiente. Las aleaciones que poseen una gran tenacidad permiten grandes deformaciones que facilitan el conformado en frío mediante trefilado. La dureza también es una característica a tener en cuenta, para soportar los esfuerzos de estirado sin sufrir daños.

Los alambres fabricados mediante trefilado tienen diversas aplicaciones. Desde alambres de gran diámetro, utilizados ampliamente en la construcción e instalaciones eléctricas hasta los más pequeños utilizados hasta en aplicaciones electrónicas.

3 Definición del problema

Finalizada la descripción del proceso de trefilado, se desarrolla a continuación el problema del trefilado, objetivo principal de este trabajo. Como ya se ha visto, es un proceso utilizado para reducir la sección de un alambre. Esta reducción se conseguirá estirando el material a través de la máquina, aplicando una fuerza de estirado que conllevará una tensión interna sobre el material.

Se considerará un límite en la tensión ejercida en función del material, de manera que al no sobrepasar este límite se asegure que la pieza no sufrirá daño. Esta tensión límite vendrá definida como un porcentaje de la tensión última de rotura, que llamaremos σ_{adm} . Como tensión admisible se ha tomado el valor utilizado en [1], y así poder comparar resultados. Siendo limitada la tensión que se puede ejercer, lo normal es que no se pueda alcanzar la reducción de diámetro deseada en una única pasada. Por ello, este proceso suele realizarse en varias pasadas del alambre por las hileras. Para el diseño de la fabricación, será conveniente conocer el número de pasadas necesario para una reducción de diámetro dada. El proceso de optimización tratará de resolver esta cuestión. En este proyecto, se hará uso de algunas herramientas de optimización metaheurística para minimizar el número de pasadas necesarias.

La variable de decisión será el valor de los diámetros al final de cada pasada. Siendo la tensión la variable limitante del proceso, será necesario calcular su valor en cada pasada del alambre por la máquina. Se supondrá que se posee la máquina con potencia suficiente para realizar la fuerza que provoque esta tensión.

Por tanto, se estudia el problema de obtener el número de pasadas mínimo que es necesario para reducir un alambre de un diámetro inicial a uno final dados. Las restricciones del problema vendrán dadas por las tensiones que se producen en el material, y que no podrán sobrepasar un cierto valor límite. Además, se tendrán en cuenta algunos parámetros del modelo, definidos por la máquina y el proceso, y algunos factores derivados del propio método de resolución.

3.1 Desarrollo matemático

A lo largo del proceso de trefilado, se buscará pasar de un diámetro inicial d_0 a un diámetro final d_f . Para ello, el alambre pasará un determinado número de veces por las hileras, que se denotará por N . Los diferentes diámetros intermedios que se obtendrán vendrán dados por los valores d_i , siendo d_1 el diámetro inicial, y d_{N+1} el diámetro final, con $i = 1, \dots, N$.

$$d_1 = d_0, d_2, \dots, d_i, \dots, d_N, d_{N+1} = d_f \quad (3.1)$$

En cada pasada i se producirá la deformación plástica del material. Esta deformación vendrá dada por la siguiente expresión en función de los diámetros de entrada (d_i) y de salida (d_{i+1}), teniendo en cuenta que el diámetro a la entrada es mayor que a la salida.

$$\varepsilon_i = \ln \left(\frac{d_i^2}{d_{i+1}^2} \right) \quad (3.2)$$

Será necesario calcular la deformación plástica acumulada en cada pasada, ε_i^c . Ésta vendrá dada por la suma de la deformación acumulada en la pasada anterior más la deformación producida en la pasada actual.

$$\varepsilon_i^c = \varepsilon_{i-1}^c + \varepsilon_i = \varepsilon_i + \varepsilon_{i-1} + \dots + \varepsilon_1 \quad (3.3)$$

Con la relación expresada en 3.2, se puede calcular la deformación acumulada en función del diámetro.

$$\varepsilon_i^c = \ln \left(\frac{d_1^2}{d_{i+1}^2} \right) \quad (3.4)$$

Para el cálculo de las tensiones, se deberá tener en cuenta el endurecimiento por deformación. Éste es un fenómeno por el cual el material aumenta su resistencia al entrar en la zona plástica de su comportamiento. En el trabajo en frío es importante considerarlo, ya que cuanto más se deforme el material más esfuerzo costará seguir deformándolo. La tensión valorando el endurecimiento por deformación puede calcularse a través de la ley de comportamiento definida en 3.5.

$$\sigma = C (\varepsilon_i^c)^n \quad (3.5)$$

Las variables C y n son el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación respectivamente, ambos propiedades constantes del material.

Analizando lo que ocurre al material en cada pasada i , se puede ver una diferencia entre la primera sección que pasa por la hilera y la última. El material que pasa primero no ha sufrido ninguna deformación extra, por lo que su tensión dependerá únicamente de la deformación acumulada previa a esa pasada. Sin embargo, la última sección que pase por la hilera llevará acumulada la deformación producida en esa misma pasada, ε_i . Teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación se puede calcular su tensión mediante la ecuación 3.5.

Por tanto, se hará uso de una tensión media a lo largo de toda la pasada. Esta tensión media, $\sigma_{ave,i}$, puede definirse como la tensión de fluencia promedio. Su expresión, utilizada en 3.6, se obtiene a través de la energía de deformación por unidad de volumen. Esta tensión de fluencia promedio puede encontrarse desarrollada en [5].

$$\sigma_{ave,i} \varepsilon_i = \int_{\varepsilon_{i-1}^c}^{\varepsilon_i^c} \sigma d\varepsilon = \int_{\varepsilon_{i-1}^c}^{\varepsilon_i^c} C (\varepsilon_i^c)^n d\varepsilon \quad (3.6)$$

Operando, se obtiene la expresión que permite calcular la tensión media en cada pasada.

$$\sigma_{ave,i} = \frac{C (\varepsilon_i^c)^{n+1} - (\varepsilon_{i-1}^c)^{n+1}}{\varepsilon_i} \quad (3.7)$$

Con la tensión media, se puede calcular la tensión de estirado de cada pasada añadiendo un factor de corrección debido a la fricción. Esta expresión, mostrada en 3.8, es propuesta por Schey en [5] y utilizada en [3] para el cálculo de las tensiones.

$$\sigma_i = \sigma_{ave,i} (1 + \mu \cot \alpha) \varepsilon_i \quad (3.8)$$

El parámetro μ es el coeficiente de fricción del material con la hilera. A mayor fricción, mayores tensiones sufrirá el alambre. En este estudio, se ha considerado constante con $\mu = 0,05$. Es el mismo valor utilizado en [1], lo que permitirá comparar los resultados obtenidos.

El ángulo α es el ángulo del tronco de cono que forma la hilera para reducir el diámetro. Con todo esto, se tiene la relación que permite calcular la tensión de cada pasada en función de los diámetros de entrada y salida (utilizando las ecuaciones 3.8, 3.7 y 3.4) y de los parámetros del proceso, expresada en 3.9.

$$\begin{aligned} \sigma_i &= C \frac{1 + \mu \cot \alpha}{n + 1} ((\varepsilon_i^c)^{n+1} - (\varepsilon_{i-1}^c)^{n+1}) \\ \sigma_i &= C \frac{1 + \mu \cot \alpha}{n + 1} \left[\left(2 \ln \frac{d_1}{d_{i+1}} \right)^{n+1} - \left(2 \ln \frac{d_1}{d_i} \right)^{n+1} \right] \end{aligned} \quad (3.9)$$

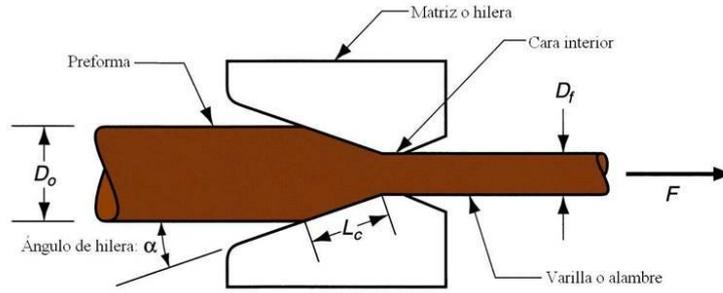


Figura 3.1 Variables de trefilado.

3.1.1 Ángulo de la hilera

El ángulo de la hilera es un parámetro de diseño importante para estudiar el proceso. La tensión producida en el material dependerá de lo pronunciado que sea el estrechamiento de la hilera, en función del coeficiente de fricción.

En este estudio, no se ha pretendido investigar la influencia del ángulo de la hilera en la tensión sufrida por el material. El ángulo α se ha considerado constante, utilizando el valor óptimo propuesto por Lange en [4] mostrado en la ecuación 3.10.

$$\cos(2\alpha_{opt}) = -3\mu\varepsilon_{max} + \sqrt{9\mu^2\varepsilon_{max}^2 + 1} \quad (3.10)$$

El valor de ε_{max} es la deformación máxima posible, que variará en cada pasada. Para este estudio, se toma un valor representativo fijado en 0,3, que es el que se utiliza en [1]. Con esto, se obtiene el valor del ángulo óptimo en 3.11.

$$\alpha = 8,5286^\circ \quad (3.11)$$

En el artículo [1], se indica que se utiliza un valor de $\alpha = 8^\circ$. Sin embargo, a la vista de los resultados que luego se expondrán, parece que en realidad se considera el valor óptimo obtenido en 3.11.

3.1.2 Factor de no homogeneidad de la deformación

El factor ϕ es una función que evalúa la no homogeneidad de la deformación en el paso del material por la hilera. Durante el estirado, la deformación del alambre provocará el endurecimiento del material, lo que influirá en el valor de las tensiones que sufra. Se incluye por tanto un factor de corrección que dependerá, de acuerdo con [3], del diámetro medio y de la longitud de contacto del alambre con la hilera, concretamente del cociente entre estas dos variables. En este proyecto, utilizaremos la expresión mostrada en 3.12.

$$\phi = \max\left(1, 0,88 + 0,12 \frac{d_i + d_{i+1}}{d_i - d_{i+1}} \sin \alpha\right) \quad (3.12)$$

Esta función multiplicará al vector de tensiones, que se calculará a partir de la expresión 3.9.

$$\sigma_i = \phi C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} ((\varepsilon_i^c)^{n+1} - (\varepsilon_{i-1}^c)^{n+1}) \quad (3.13)$$

El factor ϕ calculado de esta forma será siempre mayor que 1, por lo que hará que las tensiones necesarias sean mayores. Al considerar estas nuevas tensiones es indudable que el número de pasadas obtenido será mayor. Las tensiones originadas utilizando este factor ϕ estarán más cerca del máximo admisible σ_{adm} , por lo que habrá menor margen de maniobra para encontrar un vector de diámetros que sea solución óptima a un número de pasadas bajo. Como consecuencia, el número de pasadas óptimo aumentará al considerar la no homogeneidad de la deformación. Esta corrección no se utiliza en [1].

3.1.3 Número mínimo de pasadas

Para tener una primera aproximación del número de pasadas necesario para una reducción de diámetros dada, se va a definir una cota mínima del número de pasadas, denotada por N_{inf} . Éste será el valor del número

mínimo de pasadas necesarias para realizar esa reducción de diámetro. De cara al algoritmo de optimización, será el número de pasadas a partir del cual se comience a buscar el óptimo, ya que será imposible llevar a cabo el proceso a un número de pasadas menor.

Para ello, se va a operar con la ecuación de las tensiones. Como ya se ha comentado, la expresión de las tensiones que incluye el factor ϕ debe ser mayor que la expresión que no lo incluye.

$$\sigma_i = \phi C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} ((\varepsilon_i^c)^{n+1} - (\varepsilon_{i-1}^c)^{n+1}) \geq C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} ((\varepsilon_i^c)^{n+1} - (\varepsilon_{i-1}^c)^{n+1}) \quad (3.14)$$

Sumando todas las tensiones σ_i , utilizando una tensión media conjunta para todas las pasadas, que se denota por σ_{ave} , se obtiene que:

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i = N \sigma_{ave} \geq C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \sum_{i=1}^N ((\varepsilon_i^c)^{n+1} - (\varepsilon_{i-1}^c)^{n+1}) \quad (3.15)$$

Expresando las deformaciones acumuladas ε_i^c en función de los diámetros de cada pasada mediante la expresión 3.4, se tiene:

$$N \sigma_{ave} \geq C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \sum_{i=1}^N \left(\left(\ln \left(\frac{d_1}{d_{i+1}} \right)^2 \right)^{n+1} - \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_i} \right)^2 \right)^{n+1} \right) \quad (3.16)$$

$$= C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \sum_{i=1}^N \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_{i+1}} \right)^2 \right)^{n+1} \quad (3.17)$$

$$= C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \left(\ln \left(\frac{d_1}{d_{N+1}} \right)^2 \right)^{n+1} \quad (3.18)$$

Aplicando $d_1 = d_0$ y $d_{N+1} = d_f$, se obtiene una relación general que no depende de los diámetros interiores ni del número de pasadas, sólo de la deformación plástica acumulada final.

$$N \sigma_{ave} \geq C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \left(2 \ln \frac{d_0}{d_f} \right)^{n+1} \quad (3.19)$$

Con esto, se alcanza una cota inferior para el número de pasadas.

$$N \geq \frac{C}{\sigma_{ave}} \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \left(2 \ln \frac{d_0}{d_f} \right)^{n+1} \quad (3.20)$$

Teniendo en cuenta que la tensión media debe ser menor que la tensión máxima admisible del material ($\sigma_{ave} < \sigma_{adm}$), se sustituye esta tensión media no conocida para obtener una expresión que sólo depende de parámetros conocidos.

$$N \geq \frac{C}{\sigma_{adm}} \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \left(2 \ln \frac{d_0}{d_f} \right)^{n+1} \quad (3.21)$$

La cota mínima será el entero superior más próximo al valor obtenido de esta relación. El operador $\lceil \cdot \rceil$ define la aplicación de la función "ceiling" que obtiene ese entero superior más próximo.

$$N_{inf} = \lceil \frac{C(1 + \mu \cot g \alpha)}{(n + 1) \sigma_{adm}} \left(2 \ln \frac{d_0}{d_f} \right)^{n+1} \rceil \quad (3.22)$$

El proceso óptimo para ese número de pasadas N_{inf} permite conocer la tensión promedio de estirado σ_{ave} . Esta tensión promedio del número de pasadas mínimo debe coincidir con el resultado de las tensiones obtenido de la optimización para el caso de no utilizar la función de no homogeneidad. Se comprobará además si se alcanzan los mismos valores que en [1] para la tensión promedio.

3.1.4 Función objetivo

La elección de la función objetivo es de suma importancia para la obtención de resultados apropiados. Una mala decisión puede llevar a no resolver el problema de manera óptima, alcanzando soluciones que sean muy mejorables. En este caso, la variable que limita el desarrollo del trefilado son las tensiones.

Conocido el vector de diámetros, se pueden calcular las tensiones producidas en cada pasada σ_i , que constituirán un vector de tensiones.

$$\sigma_i = C \frac{1 + \mu \cot \alpha}{n + 1} \left[\left(2 \ln \frac{d_1}{d_{i+1}} \right)^{n+1} - \left(2 \ln \frac{d_1}{d_i} \right)^{n+1} \right] \quad (3.23)$$

Como función objetivo, se buscará minimizar la desviación típica de estas tensiones, calculada según 3.24.

$$\text{Funcion objetivo : } f_{obj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_{ave})^2}{N}} \quad (3.24)$$

Con esto, se conseguirá que las tensiones de cada pasada sean lo más parecidas posible y cercanas a la tensión media, obteniendo unas tensiones de estirado equilibradas. Así, el esfuerzo se repartirá de forma homogénea acercándose al valor máximo admisible sin excederlo, aprovechando al máximo cada pasada. Esta definición de función objetivo es la misma que utilizan Celano et al. en [1], con lo que se podrán comparar sus resultados con los alcanzados en este trabajo.

4 Método de optimización

Obtendidas las ecuaciones y variables que gobiernan el problema, se detalla en este apartado el método de optimización utilizado para resolverlo. El modelo contiene una gran variedad de parámetros y relaciones entre las variables, por lo que la optimización no es sencilla. En este proyecto, se utiliza un método de optimización metaheurística conocido como recocido simulado (SA: Simulated Annealing).

4.1 Métodos metaheurísticos: técnica del recocido simulado (SA)

La optimización metaheurística es una técnica de búsqueda del óptimo de una variable de decisión o estado que se encuentra dentro de un conjunto de estados posibles, de manera que este estado óptimo minimice o maximice una función objetivo. En concreto, la optimización metaheurística hace uso de la búsqueda aleatoria para encontrar el óptimo. Se basa en la generación aleatoria de estados posibles, con objeto de comparar el nuevo estado con el considerado óptimo, y sustituirlo en caso de que la función objetivo mejore.

El recocido simulado (SA) es un símil con el proceso de recocido de un metal. El recocido es una técnica en la que se coloca un metal a una alta temperatura para después dejarlo enfriar lentamente. Este tratamiento térmico es muy útil a la hora de relajar las tensiones residuales del metal, reconducir su estructura cristalina o reducir su fragilidad. Para realizar un recocido adecuado es necesario controlar perfectamente los tiempos y las temperaturas de enfriado. Ésto es empleado por el método metaheurístico para determinar los tiempos en los que se realiza la búsqueda aleatoria.

Frente a otros métodos de optimización basados en el uso del vector gradiente o de derivadas de la función objetivo, el recocido simulado es más eficaz para buscar el máximo o mínimo global de la función. La principal ventaja del SA (y en general de los métodos metaheurísticos) es la generación aleatoria de estados. Esta generación no se limita a buscar vecinos próximos, sino que, utilizando recursos probabilísticos, puede variar enormemente el estado de un paso a otro. Además, en el momento de aceptar un estado posible como el óptimo, se utiliza de nuevo la generación aleatoria para considerar un estado como tal aun sin mejorar la función objetivo. Con esto, se consigue escapar de extremos relativos. Aleatoriamente se saltará de un punto del espacio de estados posibles a otro, de manera que será sencillo evitar que el método arroje como óptimo global a un máximo o mínimo local. Esto es muy útil para funciones objetivo que posean una gran cantidad de picos y valles.

4.2 Recocido simulado

El recocido simulado es el método de optimización que se utilizará. Se detalla a continuación las variables que intervienen y el algoritmo utilizado.

4.2.1 Variable de decisión

En este problema, el estado será un vector de diámetros que contenga el diámetro inicial, el final, y todos los diámetros intermedios. Por tanto, se tendrá un vector de $N + 1$ componentes. El conjunto de estados será todos los vectores de diámetros que cumplan tres condiciones:

- Las componentes iniciales y finales deben ser el diámetro inicial y final respectivamente.
- Los diámetros intermedios deben tener valores entre el diámetro inicial y el final
- El vector de diámetros debe ser descendente, es decir, $d_{i+1} < d_i$, con $i = 1, \dots, N$

4.2.2 Temperatura

El recocido simulado utilizará la temperatura como una variable que determinará el paso de una búsqueda a otra. Al igual que en el tratamiento térmico, el proceso comenzará a una temperatura inicial T_0 , que irá descendiendo gradualmente. Hay muchas formas de controlar este descenso de temperatura. Las dos técnicas más utilizadas son el descenso con distribución lineal y el geométrico.

En caso de descenso lineal, la temperatura, en un instante t seguirá la siguiente expresión, donde β es la pendiente de enfriamiento.

$$T(t) = T_0 - \beta t \quad (4.1)$$

En el caso de distribución geométrica, la temperatura seguirá un descenso exponencial, función del parámetro γ , la tasa de enfriamiento.

$$T(t) = T_0 \gamma^t; \quad 0 < \gamma < 1 \quad (4.2)$$

En este proyecto, se va a utilizar la distribución geométrica, que permite sustituir la temperatura de un paso por el producto de la anterior por la tasa de enfriamiento.

$$T_i = T_{i-1} \gamma \quad (4.3)$$

La temperatura marcará el momento en el que el algoritmo deje de buscar nuevos estados. Se establecerá una temperatura mínima, T_{min} , que marque el final del algoritmo. Además de limitar el número de iteraciones que se van a realizar, la temperatura también influirá en la decisión de si aceptar un estado como óptimo o no.

En caso de que el nuevo estado que se ha generado aleatoriamente no mejore la función objetivo, se generará un valor r al azar, que se comparará con la expresión de 4.4 dependiente de la temperatura, de donde se obtiene p .

$$r = rand; \quad p = \exp\left(-\frac{\Delta f_{obj}}{T}\right) \quad (4.4)$$

Esta expresión proviene de la distribución de Boltzmann [2]. Si el valor de p es mayor que r , se aceptará el nuevo valor del estado aunque no sea óptimo.

Cuando la temperatura aumente, es decir, aumente el número de iteraciones realizadas, el valor de p se verá muy disminuido. Así, la probabilidad de que p sea mayor que r descenderá. Esto es así para que el algoritmo acepte muy pocas soluciones no óptimas cuando el bucle está terminando. Al principio, es cuando, en teoría, se está más lejos de la solución, por lo que es necesario que los nuevos estados abarquen todo el espacio de soluciones. Sin embargo, al final se encontrará mucho más cerca del óptimo, por lo que no serán necesarios saltos grandes en el estado.

4.2.3 Generación del nuevo vector de diámetros

La búsqueda de nuevos estados factibles que puedan optar a considerarse óptimos es otro de los aspectos importantes en el algoritmo. Es necesario que aporte variedad a las soluciones consideradas, al mismo tiempo que asegure que todos los vectores de diámetro utilizados sean factibles, esto es, pertenezcan al conjunto de estados posibles.

En el recocido simulado estos nuevos vectores se generan de forma aleatoria, siendo un método metaheurístico. Las posibilidades a la hora de establecer una técnica para la generación son muy amplias. Aquí se ha optado por una búsqueda basada en vecinos.

Dos estados vecinos son aquellos que comparten algunos elementos. En el caso de los vectores de diámetros, serán vecinos aquellos que compartan algunos diámetros intermedios. La técnica de búsqueda de nuevos

estados consistirá en variar algunos de los componentes del vector para generar nuevos estados, que sean posibles.

El procedimiento es sencillo. Se parte de un vector de diámetros, d . De forma aleatoria, se elige una posición, que llamaremos k . A continuación, se varían todas las componentes desde esa posición k hasta $N + 1$, sumando o restando una variable, también aleatoria, que se llamará h .

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{N+1}]$$

$$d_{new} = [d_1, d_2, \dots, d_k + h, d_{k+1} + h, \dots, d_N + h, d_{N+1}]$$

Posteriormente, habrá que verificar si el nuevo vector de diámetros es factible. Se comprobará si hay algún salto desde d_i hasta d_{i+1} en el que el vector aumente de diámetro, lo cual no es factible. Si esto sucede, habrá que calcular un nuevo vector de diámetros hasta encontrar un estado que sí sea factible.

4.2.4 Algoritmo SA

Se desgana a continuación paso a paso cómo el algoritmo SA calcula nuevos estados y toma decisiones acerca del óptimo, así como las iteraciones que realiza, los pasos de las funciones y las condiciones de parada.

- En primer lugar, se necesita un vector de diámetros inicial con el que comenzar a comparar, d_{ini} .
- Se establece la temperatura inicial T_0 , la temperatura mínima T_{min} y la tasa de enfriamiento γ
- Se calcula un nuevo vector de diámetros d
- Se calcula el incremento de la función objetivo:

$$\Delta f_{obj} = f_{obj}(d) - f_{obj}(d_0) \quad (4.5)$$

- Si la función objetivo ha mejorado ($\Delta f_{obj} < 0$), entonces se acepta d como óptimo

$$d_{opt} = d; d_{ini} = d \quad (4.6)$$

- Si la función objetivo no ha mejorado ($\Delta f_{obj} \geq 0$), se acepta d como óptimo si $r < p$
- Se calcula la nueva temperatura como $T = \gamma T$
- Si la temperatura T es mayor que T_{min} o la variación de f_{obj} es mayor que una tolerancia definida previamente, se calcula un nuevo vector de diámetros y repetimos el proceso

Para utilizar este algoritmo es necesario elegir algunos parámetros característicos de la optimización, como son T_0 , T_{min} y γ . Éstos condicionan el método modulando el número de iteraciones realizadas. En este proyecto no se busca analizar su influencia en la convergencia, aunque se sabe que tienen una influencia importante. Después de algunas pruebas para encontrar aquellos parámetros que permitan alcanzar soluciones aceptables se han utilizado valores típicos del método según [2]. En este caso, la temperatura inicial es $T_0 = 1$, la temperatura mínima $T_{min} = 10^{-200}$ y la tasa de enfriamiento $\gamma = 0.995$

4.2.5 Algoritmo de optimización

Definido el algoritmo SA, la búsqueda del número de pasadas mínimo se realizará de la siguiente manera. En primer lugar, se calcula la cota mínima del número de pasadas para tomarlo como punto de partida. Una vez fijado N , se genera un vector de diámetros inicial de tamaño $N + 1$ para comenzar con el algoritmo SA. Éste se establecerá como un vector de componentes equiespaciadas desde el diámetro inicial hasta el final.

$$d_{i+1} = d_i + \frac{d_f - d_0}{N} \quad (4.7)$$

Con este vector de diámetros inicial comienza el algoritmo SA. Éste proporcionará los diámetros que producen una menor desviación típica entre las tensiones de cada pasada, que es la función objetivo. Una vez obtenido el óptimo, habrá que comprobar que cumplen la limitación de nuestro problema, es decir, que

ninguna de las tensiones supera el valor máximo admisible σ_{adm} .

Si esto no se cumple, significará que no hay ninguna combinación de diámetros solución para ese número de pasadas. Por tanto, se aumentará en 1 el valor de N y volveremos a utilizar el algoritmo SA.

El bucle parará cuando la solución óptima encontrada por SA no contenga ninguna pasada que supere el límite de las tensiones. Cuando eso ocurra, ese número de pasadas será el mínimo posible, y el vector de diámetros la solución del trefilado.

5 Empleo del algoritmo de optimización

Ningún algoritmo de optimización es perfecto para resolver cualquier problema que se presente. Cada algoritmo tendrá ciertas características útiles para un problema específico, y quizás algunas otras que perjudiquen la convergencia. Este proyecto trata de comprobar la capacidad del algoritmo SA previamente detallado para resolver el problema de trefilado. Se utilizarán varios ejemplos para comprobar las bondades del algoritmo así como la fortaleza del método en este problema concreto.

Se resolverá el problema utilizando las tensiones conseguidas a través de la teoría y añadiendo el factor ϕ . También se comprobará la cota mínima de pasadas y se estudiará la función objetivo con el fin de buscar alguna mejora a lo largo del proceso.

Se han considerado dos tipos de materiales: una aleación de aluminio AA-6061-O, y una aleación de acero AISI 4135. Las propiedades mecánicas del material se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.1 Propiedades del material.

Material	$C(MPa)$	n	$\sigma_{adm}(MPa)$
AA 6061-O	205	0,2	90
Annealed AISI 4135	1015	0,17	262

5.1 Resultados

En primer lugar, se ha realizado un análisis sin considerar la función ϕ definida en el apartado 3.1.2. Utilizando las expresiones teóricas, se han obtenido los menores valores de N posibles. De hecho, su valor óptimo debe estar muy cercano a la cota inferior que calculamos N_{inf} . Además, se realizan una serie de estudios que se comentarán posteriormente.

$$\sigma_i = C \frac{1 + \mu \cot g \alpha}{n + 1} \left[\left(2 \ln \frac{d_1}{d_{i+1}} \right)^{n+1} - \left(2 \ln \frac{d_1}{d_i} \right)^{n+1} \right] \quad (5.1)$$

A partir del algoritmo se calcula el número mínimo de pasadas obtenido, el valor de la tensión media y el coeficiente de variación CV . Este coeficiente es una representación de la desviación de las tensiones de cada pasada con respecto a la tensión media. Esta definición es la misma utilizada en [1]

$$CV(\%) = 100 \frac{1}{\sigma_{ave}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_{ave})^2}{N}} \quad (5.2)$$

En las tablas 5.2 y 5.3 se muestran los resultados obtenidos para el aluminio y el acero respectivamente. Son valores similares a los obtenidos por Celano et al. en [1].

Como se puede comprobar, los valores del número de pasadas óptimo son iguales a la cota inferior. Al utilizar la expresión sin el factor de no homogeneidad de las deformaciones el valor de N_{inf} debe ser el

Tabla 5.2 Resultados para aluminio.

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$
2	0,5	9	9	86,05	0,30
1,2	0,24	11	11	84,22	0,7

Tabla 5.3 Resultados para acero.

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$
3	0,485	21	21	250,11	2,45
2,5	0,41	20	21	247,81	3,62
1,5	0,242	21	21	250,44	3,49
1,2	0,193	21	21	250,94	2,85
1	0,161	21	21	250,78	3,68
0,8	0,127	21	21	253,04	2,79
0,6	0,096	21	21	251,78	3,80
0,5	0,081	21	21	249,78	3,17

óptimo. Debido a la aleatoriedad del algoritmo, los resultados pueden sufrir algunas variaciones.

El coeficiente de variación arroja valores pequeños, por lo que los valores de las tensiones no están muy dispersos. Se encuentran cercanos al valor medio. Aún así, al ser un proceso que hace bastante uso de la aleatoriedad, este valor variará si se resuelve de nuevo el mismo problema. No así el número de pasadas y la tensión media de estirado, que tienen un valor óptimo muy localizado.

En la tabla 5.4 se muestran los diámetros finales de cada pasada, así como la reducción porcentual del área y la tensión ejercida en cada una de ellas para el caso de $r_i = 2mm$, $r_f = 0.5mm$.

$$\Delta A_i(\%) = 100 \frac{A_i - A_{i+1}}{A_i} \quad (5.3)$$

Tabla 5.4 Desglose de pasadas para aluminio.

i	$d_i(mm)$	$\Delta A_i(\%)$	$\sigma_i(MPa)$
1	4	35,68	85,33
2	3,208	29,41	86,19
3	2,695	27,28	86,08
4	2,298	26,03	86,27
5	1,977	25,07	86,15
6	1,711	24,33	86,05
7	1,488	23,75	86,08
8	1,299	23,29	86,18
9	1,138	22,85	86,12
10	1	-	-

Puede observarse cómo las tensiones de cada pasada tienen poca diferencia, estando muy cerca de la tensión media de estirado, que en este caso es de $\sigma_{ave} = 86.05MPa$. Esto coincide con el valor pequeño que obtuvimos de CV (0.3%).

En cuanto a la reducción de área, se encuentra una tendencia clara. Las mayores reducciones se producen en las primeras pasadas del proceso. Esto es así debido al endurecimiento por deformación, que hace que en las últimas pasadas la rigidez del material sea mayor, por lo que las deformaciones producidas serán más pequeñas. Por tanto, una buena estrategia sería aprovechar el principio del proceso, cuando el material no ha sido deformado, para realizar las mayores disminuciones del diámetro. Para alcanzar una cierta reducción de

área se requiere más esfuerzo de estirado en las últimas pasadas, donde el material ya ha sido deformado y por tanto endurecido.

En la tabla 5.5 se muestra el mismo desarrollo de cada pasada, para el caso del acero, alcanzando las mismas conclusiones.

Tabla 5.5 Desglose de pasadas para acero.

i	$d_i(mm)$	$\Delta A_i(\%)$	$\sigma_i(MPa)$
1	6	21,98	223,65
2	5,299	19,17	241,01
3	4,765	18,32	248,18
4	4,306	17,28	244,84
5	3,916	16,98	249,58
6	3,568	16,88	255,53
7	3,253	16,41	254,13
8	2,974	15,99	252,46
9	2,726	15,71	252,27
10	2,503	15,56	253,81
11	2,299	15,23	251,59
12	2,117	15,09	252,53
13	1,951	14,93	252,69
14	1,799	14,87	254,35
15	1,66	14,61	252,24
16	1,534	14,48	252,19
17	1,4188	14,29	251,06
18	1,313	14,23	251,97
19	1,216	14,12	252,05
20	1,127	13,98	251,30
21	1,045	13,92	251,89
22	0,97	-	-

5.1.1 Comprobación del número mínimo de pasadas

Como se comentó anteriormente, al utilizar las tensiones obtenidas sin considerar el factor de no homogeneidad de las deformaciones la cota mínima del número de pasadas es en efecto el valor óptimo que se debe alcanzar. Por tanto, se va a comprobar que esto es así, y que el método encuentra la solución para ese valor de N .

En el cálculo anterior, se utilizaba la cota mínima N_{inf} como punto de partida para encontrar el número de pasadas óptimo. Ahora, comenzará el algoritmo con $N = 1$. No debería encontrar una solución que satisfaga el límite de las tensiones admisibles con valores de N por debajo de la cota mínima. Al alcanzar N_{inf} , por el contrario, debería detenerse y devolver una solución factible.

Tabla 5.6 Comprobación de la cota mínima del número de pasadas para el aluminio.

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N
2	0,5	9	9
1,2	0,24	11	11

En la tabla 5.6 y 5.7 se puede apreciar cómo el número de pasadas obtenido coincide con la cota mínima calculada con anterioridad. Con esto, se puede verificar que la expresión utilizada para N_{inf} es muy útil como primera aproximación del número de pasadas necesario para llevar a cabo el trefilado.

Si en el modelo matemático se tuvieran en cuenta algunas consideraciones extras, como un cálculo de tensiones más precisas o comportamientos en el contacto matriz-pieza más realistas, el número de pasadas

Tabla 5.7 Comprobación de la cota mínima del número de pasadas para el acero.

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N
3	0,485	21	21
2,5	0,41	20	21
1,5	0,242	21	21
1,2	0,193	21	21
1	0,161	21	21
0,8	0,127	21	21
0,6	0,096	21	21
0,5	0,081	21	21

obtenido sería siempre mayor que esta cota. Por tanto, puede considerarse un buen valor para comenzar a buscar una solución óptima.

5.2 Resultados con factor de no homogeneidad

A continuación, se va a incluir la función ϕ en el cálculo de las tensiones. Como ya se ha comentado, esta función va a aumentar el valor de las tensiones de cada pasada, lo que hará que la solución óptima se encuentre para valores mayores de N en comparación con el caso anterior.

Tabla 5.8 Resultados para aluminio (factor ϕ).

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$
2	0,5	9	10	88,70	0,27
1,2	0,24	11	12	89,1	0,97

Tabla 5.9 Resultados para acero (factor ϕ).

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$
3	0,485	21	32	249,75	4,34
2,5	0,41	20	32	248,28	3,97
1,5	0,242	21	32	249,75	4,61
1,2	0,193	21	33	245,69	4,91
1	0,161	21	33	245,58	4,42
0,8	0,127	21	33	246,91	4,70
0,6	0,096	21	32	250,76	4,08
0,5	0,081	21	32	249,27	5,33

En las tablas 5.8 y 5.9 se encuentran las soluciones óptimas alcanzadas mediante SA. Es llamativo el aumento en el número de pasadas óptimo. En el caso del acero, se llegan a necesitar más de 10 pasadas extra. Esto concuerda con lo que se esperaba, en vista del aumento de las tensiones aplicadas.

La tensión media también varía, aunque está muy cerca de los valores del caso anterior. En cuanto al CV, la dispersión aumenta en todos los casos.

Se expone en las tablas 5.10 y 5.11 el progreso de los diámetros, las tensiones y la reducción de área a lo largo de las pasadas de estirado, de igual forma que para el caso en el que no se utilizaba el factor ϕ .

Se pueden comprobar las mismas conclusiones extraídas para el caso de no utilizar el factor ϕ . En general, la reducción de área disminuye al avanzar en las pasadas y las tensiones son homogéneas, especialmente en el caso del aluminio. Para el acero, los resultados varían un poco debido al alto número de pasadas.

Tabla 5.10 Desglose de pasadas para aluminio (factor ϕ).

i	$d_i(mm)$	$\Delta A_i(\%)$	$\sigma_i(MPa)$
1	4	35,41	88,05
2	3,215	27,99	88,79
3	2,728	25,59	88,93
4	2,353	23,99	88,59
5	2,052	23,02	88,94
6	1,8	22,09	88,64
7	1,588	21,45	88,78
8	1,408	20,89	88,84
9	1,253	20,38	88,79
10	1,118	19,94	88,74
11	1	-	-

Tabla 5.11 Desglose de pasadas para acero (factor ϕ).

i	$d_i(mm)$	$\Delta A_i(\%)$	$\sigma_i(MPa)$
1	6	17,03	204,77
2	5,465	15,65	239,12
3	5,019	12,47	220,26
4	4,696	13,08	238,5
5	4,378	13,35	251,39
6	4,076	12,75	251,27
7	3,807	11,93	246,47
8	3,573	12,38	257,99
9	3,344	11,98	257,43
10	3,138	11,82	259,4
11	2,946	10,92	250,21
12	2,781	11,43	260,94
13	2,617	10,85	255,52
14	2,471	10,51	253,42
15	2,338	10,44	254,89
16	2,212	9,95	249,91
17	2,099	10,31	257,41
18	1,988	9,96	254,31
19	1,886	9,85	254,56
20	1,791	9,39	249,42
21	1,705	9,46	252,04
22	1,622	9,39	252,7
23	1,544	9,14	250,17
24	1,472	9,11	251,27
25	1,403	9,22	254,3
26	1,337	9,13	254,28
27	1,274	8,96	252,97
28	1,216	8,73	250,59
29	1,162	8,83	253,27
30	1,109	8,62	251,13
31	1,06	8,41	248,76
32	1,015	8,63	253,39
33	0,97	-	-

5.3 Aleatoriedad del método

Una de los aspectos más característicos de los métodos metaheurísticos es el uso de la probabilidad. Se utilizan variables aleatorias para conseguir los nuevos estados que se evaluarán en busca del óptimo. En el SA, incluso la aceptación de un estado como óptimo es aleatoria.

Esto es muy útil para funciones objetivo con muchos picos y valles, pero no todos los problemas son tan complejos. Se realizará a continuación un análisis de la función objetivo, para intentar constatar si la aleatoriedad es tan necesaria.

5.3.1 Análisis de la función objetivo

Se recuerda que la función objetivo a minimizar es la desviación típica de las tensiones de estirado de cada pasada.

$$\text{Funcion objetivo: } f_{obj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_{ave})^2}{N}} \quad (5.4)$$

Con vistas a conocer en mayor detalle cómo evoluciona esta función, se ha realizado un estudio para el caso de 3 pasadas. El vector de diámetros, por tanto, tendrá 4 componentes. La primera componente será el diámetro inicial y la última el diámetro final.

$$d = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]$$

$$d_1 = d_0, \quad d_4 = d_f$$

Para comprender la forma de la función objetivo se calcula f_{obj} en función de los diámetros interiores. Se realiza un barrido de valores en los diámetros intermedios d_2 y d_3 . El diámetro d_2 variará entre d_0 y d_f , mientras que d_3 no podrá ser mayor que d_2 .

$$d_2 \in (d_f, d_0); \quad d_3 \in (d_f, d_2) \quad (5.5)$$

Para cada pareja de valores d_2 y d_3 se calcula la desviación típica. Se muestra en las figuras 5.1 y 5.2 una representación gráfica de la función objetivo en función del valor de ambos diámetros intermedios para el caso del aluminio y el acero respectivamente.

Analizando la función objetivo mostrada en las figuras, se puede ver que tiene una distribución muy suave. Existe un claro mínimo global, que coincide con el único mínimo local que existe.

El algoritmo SA contiene un método de búsqueda aleatoria. Los estados que optan a ser el óptimo se obtienen moviéndonos continuamente por todo el espacio de estados posibles. Esto se realiza para evitar que el método quede atrapado en un mínimo local.

Sin embargo, a la vista de las gráficas mostradas, no parece lo más adecuado para este problema. Siendo la función tan regular, está claro dónde se encuentra la solución óptima. Por tanto, se intentará restar aleatoriedad al método y así comprobar si encuentra la solución.

Hay que recalcar que este análisis se ha elaborado para un número de pasadas bajo. El ejemplo parece bastante significativo, pero no podemos asegurar si este patrón de la función se mantendría si aumentáramos el número de pasadas. Se deja el análisis aquí al no poder dibujar la función para un mayor número de variables, aunque sería muy interesante comprobar si la no existencia de mínimos locales sigue sucediendo.

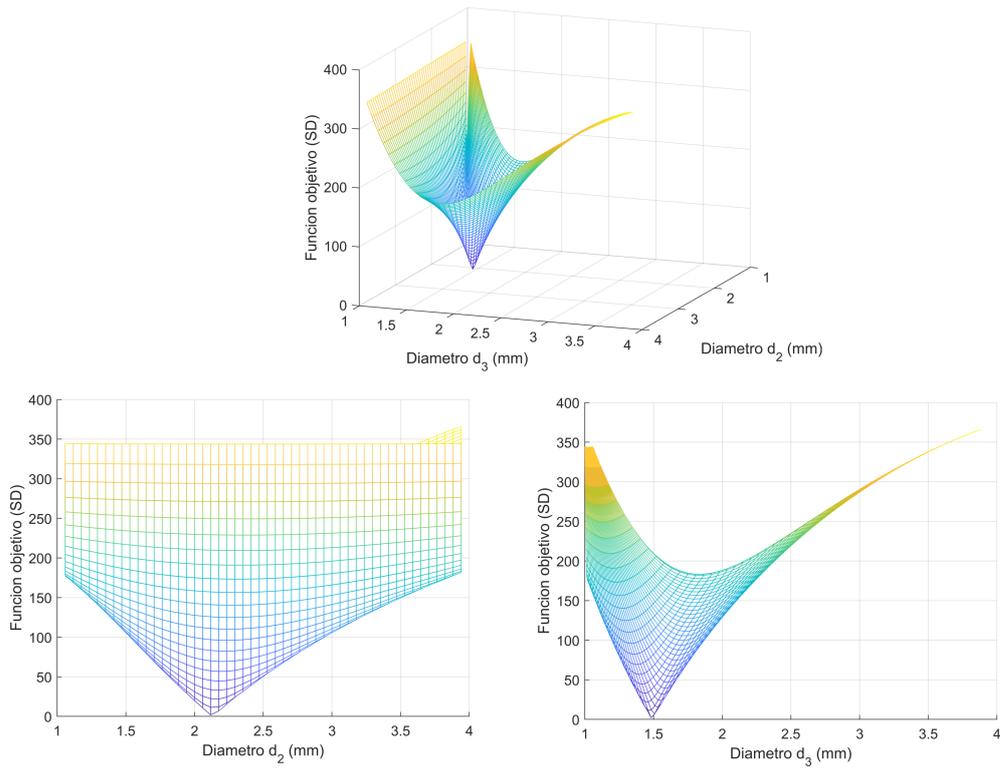


Figura 5.1 Función objetivo para aluminio.

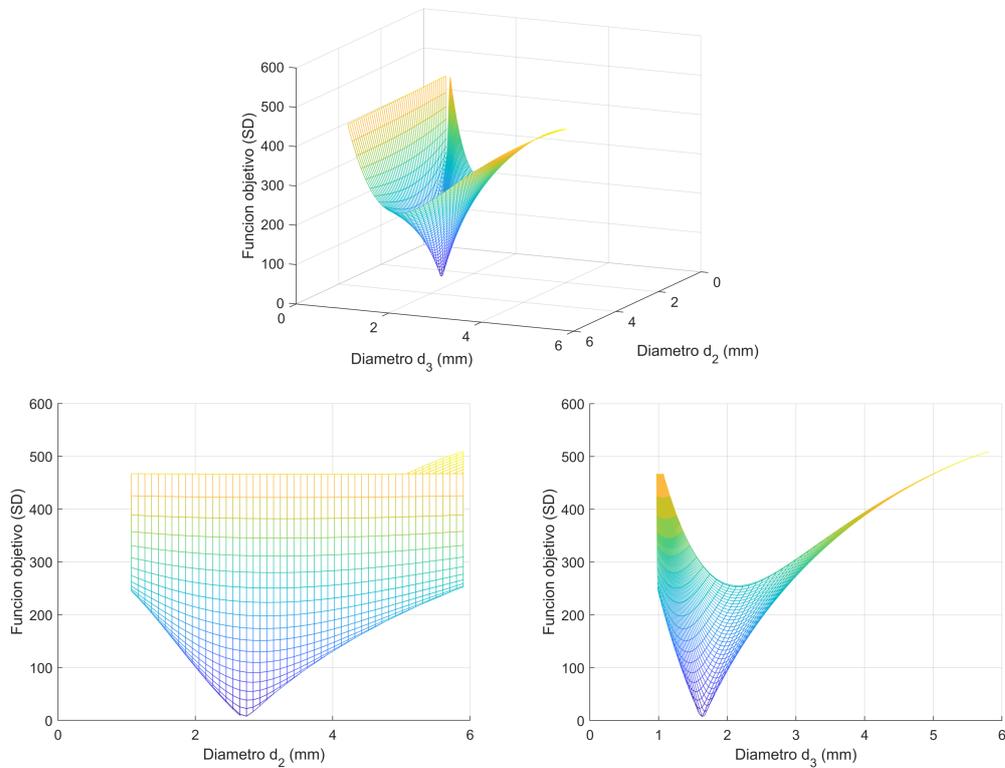


Figura 5.2 Función objetivo para acero.

5.3.2 Aceptación no aleatoria del óptimo

Teniendo en cuenta que la función objetivo parece no ser demasiado compleja, se retirará del algoritmo SA la sección en la que se aceptan estados que no son óptimos. Para ello, se elimina de SA el cálculo de las variables r y p que decidían si aceptarlos o no.

Por tanto, la única manera que tendrá el algoritmo para sustituir un vector de diámetros óptimos será encontrar otro que tenga un valor de la función objetivo menor. Así, el estado irá cayendo hasta alcanzar el mínimo de la función.

Tabla 5.12 Resultados para aluminio (no aleatoriedad).

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$	$t_{rand}(s)$	$t(s)$
2	0,5	9	9	86,05	0,36	4,01	4,68
1,2	0,24	11	11	84,22	1,04	3,94	4,13

Tabla 5.13 Resultados para acero (no aleatoriedad).

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$	$t_{rand}(s)$	$t(s)$
3	0,485	21	21	250,11	3,46	5,96	5,4
2,5	0,41	20	21	247,81	4,08	10,85	9,54
1,5	0,242	21	21	250,44	3,09	5,32	5,48
1,2	0,193	21	21	250,94	3,07	5,28	5,23
1	0,161	21	21	250,78	2,87	5,65	5,75
0,8	0,127	21	21	253,04	2,39	6,81	5,95
0,6	0,096	21	21	251,77	2,81	5,55	6,11
0,5	0,081	21	21	249,78	4,04	5,88	6,35

En la tabla 5.12 se recogen los resultados obtenidos para el aluminio y en la tabla 5.13 los resultados para el acero. Para este estudio no se ha incluido el factor ϕ .

Para comparar la conveniencia de utilizar la variante aleatoria o no, se ha calculado el tiempo que toma el algoritmo en hallar la solución, medido desde que comienza a calcular con N_{inf} hasta que halla una solución que cumpla $\sigma_{max} < \sigma_{adm}$. En la tabla, el valor t_{rand} es el tiempo del algoritmo utilizado hasta ahora, y el valor de t es el tiempo que toma el que no tiene aceptación aleatoria del óptimo. El cálculo del tiempo se ha realizado con el comando 'tic-toc' de MATLAB.

Se puede observar que no existe ninguna diferencia significativa con los resultados obtenidos con el método completo. El número de pasadas es el mismo, y se mantiene la tensión de estirado. Los tiempos tampoco mejoran con respecto al anterior algoritmo. Aún así, es cierto que, sin aceptación aleatoria del óptimo, el algoritmo tendrá que realizar menos cálculos y es más difícil que cometa errores.

Por lo tanto, se puede concluir que para este problema concreto de trefilado no sería necesario utilizar variables tan aleatorias. La función objetivo es suave, por lo que alcanzar el mínimo no es tan complejo como para necesitar saltos grandes en los estados considerados óptimos. Con o sin aleatoriedad, los resultados obtenidos son muy similares.

5.3.3 Aceptación no aleatoria del óptimo. Factor de no homogeneidad

Se ha comprobado que, en este problema concreto, el algoritmo SA no necesita la aceptación aleatoria de estados como óptimos para escapar de mínimos locales. El nuevo algoritmo funciona correctamente, arrojando los mismos resultados. Esto puede ser de gran utilidad al introducir la función ϕ en el cálculo de las tensiones. Estas tensiones son mayores, por lo que el número de pasadas es mayor. En este contexto, ahorrar cálculos al algoritmo, no permitiendo esta aceptación aleatoria puede ahorrar tiempo y problemas de cálculo.

Se aplicará la misma metodología que en el apartado anterior. Se eliminará la comparación r/p del algoritmo del código 'Saphi', y se mostrarán los resultados que presenta en las tablas 5.14 y 5.15.

Tabla 5.14 Resultados para aluminio (no aleatoriedad, factor ϕ).

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$	$t_{rand}(s)$	$t(s)$
2	0,5	9	10	88,7	0,82	5,09	5,05
1,2	0,24	11	12	89,1	1,04	4,19	4,87

Tabla 5.15 Resultados para acero (no aleatoriedad, factor ϕ).

$r_0(mm)$	$r_f(mm)$	N_{inf}	N	$\sigma_{ave}(MPa)$	$CV(\%)$	$t_{rand}(s)$	$t(s)$
3	0,485	21	32	249,79	3,44	48,74	43,5
2,5	0,41	20	32	248,09	5,13	47,02	48,2
1,5	0,242	21	32	249,84	4,94	48,75	43,18
1,2	0,193	21	33	245,86	4,39	47,53	50,03
1	0,161	21	33	245,84	3,79	49,19	48,27
0,8	0,127	21	32	251,67	3,88	52,62	43,32
0,6	0,096	21	32	250,69	4,65	41,98	46,04
0,5	0,081	21	32	249,51	4,36	47,06	44,18

Se alcanzan conclusiones similares al caso de no considerar el factor ϕ . El número de pasadas y la tensión media se mantienen con valores semejantes. En el caso de los tiempos, son valores similares para ambos algoritmos, algunos mejoran y otros empeoran.

A la vista de los resultados, la aleatoriedad no influye en la solución obtenida. La función objetivo no parece tener muchos extremos relativos, por lo que mantener el estado óptimo en cada iteración sólo sustituyéndolo al mejorar la desviación alcanza resultados adecuados.

6 Conclusiones y trabajos futuros

Solucionar el problema de trefilado consiste en encontrar los diámetros finales de las diferentes pasadas del alambre por las hileras, que definen el número de pasadas necesarias. A lo largo del proyecto, se ha pretendido realizar un análisis sobre el rendimiento de los métodos metaheurísticos, en particular el algoritmo Simulated Annealing, en la búsqueda de la configuración óptima del proceso de trefilado. Con el número de pasadas necesario como resultado más importante, se ha implementado en base a la teoría de optimización un código que resuelve el problema del trefilado. El desarrollo del problema contempla variables tan complejas como los diámetros finales de cada pasada, que pueden tomar distribuciones muy diferentes. Sin embargo, se ha comprobado que los métodos metaheurísticos tienen características provechosas para la optimización, consiguiendo una rutina simple que obtiene el valor óptimo, condicionado por las tensiones. Los resultados obtenidos son aceptables, comparados con algunas investigaciones previas [1].

En relación con las tensiones, la no homogeneidad a lo largo de una pasada, modelada por el factor ϕ , mantiene una fuerte influencia sobre la optimización. Se han alcanzado procesos con un mayor número de pasadas que si no son consideradas. Tal y como se esperaba antes de obtener los resultados, aumentar el valor de las tensiones al aceptar la no homogeneidad hace más difícil cumplir la restricción de la tensión máxima admisible. La cota inferior en el número de pasadas es una buena aproximación al resultado final, coincidiendo con el número de pasadas óptimo para el caso de deformaciones homogéneas.

El proceso de optimización depende fuertemente de la función objetivo elegida, en este caso la desviación típica de las tensiones. Mediante un simple análisis, se ha podido ver que la evolución en función de los diámetros de las pasadas (nuestra variable de decisión) es muy suave. Esto ha permitido reducir la aleatoriedad del método, que buscaba alejarse de extremos relativos en beneficio de encontrar extremos absolutos. Con ello, se ha confirmado que el método alcanza resultados similares adoptando más o menos aleatoriedad, para el caso concreto del problema de trefilado. Además, los tiempos que toma el algoritmo en arrojar un resultado son similares en ambos casos, siendo valores asumibles.

Para proyectos futuros, sería muy interesante seguir explorando los algoritmos metaheurísticos. Existen gran cantidad de ellos, como algoritmos genéticos, de partículas (Particle Swarm Algorithms), o los llamados algoritmo del murciélago (Bat Algorithm) o de las luciérnagas (Firefly Algorithms). Todos ellos comparten la búsqueda aleatoria de candidatos, igual que el Recocido Simulado. Esto permitiría comparar cuál de ellos es más apropiado para el caso del trefilado, en términos de soluciones encontradas o tiempos de cálculo empleados. También sería importante investigar en la influencia de los parámetros del problema que hemos considerado. Por ejemplo, el coeficiente de fricción μ interviene en las tensiones generadas en el material. Se ha considerado un valor del ángulo de la hilera fijo, en función de la expresión del ángulo óptimo. Cabría investigar cómo interviene en la optimización la variación del ángulo de la hilera. Además, se pueden resolver más problemas de trefilado para verificar la robustez del método.

Apéndice A

Códigos MATLAB

A continuación se recogen los códigos de los programas de MATLAB utilizados para la resolución del problema. Todos los códigos han sido implementados paso a paso a través de la teoría del trefilado y del método Simulated Annealing, apoyados por [2].

A.1 Programa principal

El código principal constituye el bucle externo que proporciona al algoritmo SA el vector de diámetros inicial para comenzar la optimización. Se encarga de:

- Definir las constantes del material y del proceso de trefilado
- Introducir los valores del radio inicial y final
- Calcular la cota mínima de pasadas
- Correr el bucle que aumenta el número de pasadas, llamando a la rutina "SA" que proporciona la solución óptima

El algoritmo escapará del bucle cuando la solución que proporciona "SA" sea tal que su tensión máxima sea inferior al valor máximo admitido. Después, calculará el valor de la tensión media y el coeficiente de variación, que definiremos más tarde.

Código A.1 Programa principal.

```
clear all; clc
global C
global n
global mu
global alpha

%Parametros del material y la maquina
C = 1015;
n = 0.17;
sigma_adm = 262;
mu = 0.05;
alpha = 8.5286;

%Radio/diametro inicial y final
r_0 = 1.5;
r_f = 0.242;
d_0 = r_0*2;
d_f = r_f*2;
```

```

%Cota inferior del numero de pasadas
N_inf = ceil(C*(1+mu*cot(alpha*pi/180))*((2*log(d_0/d_f))^(n+1))/(sigma_adm*(n
+1)))

N = N_inf-1;
sigma_max = sigma_adm+1;

while sigma_max > sigma_adm
    N = N+1;
    d0 = zeros(N+1,1);

    %Vector diametros inicial equiespaciado
    d0(1) = d_0 ;
    incr = (d_f-d_0)/N;

    for k=1:N-1
        d0(k+1)=d0(k)+incr;
    end

    d0(N+1) = d_f;

    %Llamada a Simmulated Annealing
    [d_opt,f_opt] = SA(d0);

    %Tension maxima
    sigma_max = max(f_opt);
end

%Vector de tensiones
sigma = fun(d_opt);

%Tension media
sigma_med = mean(sigma)

%Coeficiente de variacion
CV =100*std(sigma,1)/sigma_med

```

A.2 Programa SA

Éste es el código que implementa la optimización mediante el método Simulated Annealing. Calculará nuevos vectores de diámetros y comprobará si mejoran la solución hasta que la temperatura alcance el valor mínimo o la diferencia de la función objetivo sea menor que una tolerancia fijada.

Comenzará con el vector inicial que le hemos proporcionado. Adoptará el nuevo vector de diámetros como óptimo si el valor de su desviación típica es menor que el anterior óptimo o si de forma aleatoria se cumple que $r < p$.

Dependiendo de si se quiere utilizar el factor ϕ en el cálculo de las tensiones, se utilizarán las funciones "fun" y "funsd" (no lo incluyen) o las funciones "funphi" y "funsdphi" (sí incluyen el factor ϕ).

Código A.2 Programa SA.

```

function [d_opt,f_opt]=SA(d0)

T0 = 1;

```

```

gamma = 0.995;
Tmin = 1e-200;
T = T0;

d_old = d0;
deltaf = 1;
tol = 1e -4;

while T>Tmin || abs(deltaf)>tol
    %Calculamos nuevo d
    d = randomiz(d_old);

    %Calculamos el incremento de funcion
    f_d0 = funsd(d_old);
    f_d = funsd(d);
    deltaf = f_d-f_d0 ;

    %Aceptamos si es mejor
    if deltaf <=0
        d_old = d;
        d_opt = d;
        f_opt = fun(d_opt);
    end

    %Si no es mejor aceptamos aleatoriamente
    if deltaf >0
        r = rand ;
        p = exp(-deltaf/T);
        if r<p
            d_opt = d;
        end
    end

    T = gamma*T;
end
end

```

A.3 Programa fun

El código "fun" calcula las tensiones de estirado de cada pasada para un vector de diámetros dado.

Código A.3 Programa fun.

```

function f=fun(d)

global C;
global n;
global mu;
global alpha;

for i=1:length(d)-1
    sigma(i) = C*(1+mu*cot(alpha*pi/180))*((2*log(d(1)/d(i+1)))^(n+1)-(2*log(d(1)
        /d(i)))^(n+1))/(n+1);
end

```

```
f=sigma';
end
```

A.3.1 Programa funphi

El código "funphi" calcula igualmente las tensiones de estirado, pero incluyendo el factor de no homogeneidad de las tensiones ϕ .

Código A.4 Programa funphi.

```
function f=funphi(d)
global C;
global n;
global mu;
global alpha;

for i=1:length(d)-1
    sigma(i) = max (1,0.88+0.12*((d(i)+d(i+1))/(d(i)-d(i+1)))*sin(alpha*pi/180))*
        C*(1+mu*cot(alpha*pi/180))*((2*log(d(1)/d(i+1)))^(n+1)-(2*log(d(1)/d(i)))
            ^ (n+1))/(n+1);
end

f=sigma';
end
```

A.4 Programa funsd

El código "funsd" se encarga de calcular la función objetivo del problema, esto es, la desviación típica del vector de tensiones.

Código A.5 Programa funsd.

```
function f=funsd(d)
global C;
global n;
global mu;
global alpha;

sigma=zeros(length(d)-1,1);

for i =1:length(d)-1
    sigma(i) = C*(1+mu*cot(alpha*pi/180))*((2*log(d(1)/d(i+1)))^(n+1)-(2*log(d(1)
        /d(i)))^(n+1))/(n+1);
end

f = std(sigma,1);
end
```

A.4.1 Programa funsdphi

El código "funsdphi" calcula la desviación típica de las tensiones, incluyendo el factor ϕ .

Código A.6 Programa funsdphi.

```

function f=funsdphi(d)
global C;
global n;
global mu;
global alpha;

sigma = zeros(length(d)-1,1);

for i=1:length(d)-1
    sigma(i) = max (1, 0.88+0.12*((d(i)+d(i+1))/(d(i)-d(i+1)))* sin(alpha*pi/180)
        )*C*(1+mu*cot(alpha*pi/180))*((2*log(d(1)/d(i+1)))^(n+1)-(2*log(d(1)/d(i)
        ))^(n+1))/(n+1);
end

f = std(sigma,1);
end

```

A.5 Programa randomiz

El código "randomiz" es el encargado de generar los nuevos vectores de diámetros a partir del anterior mediante la estrategia de vecinos.

Código A.7 Programa randomiz.

```

function vnew=randomiz(v)
vnew = v;
M = length(vnew);
z = 1;

while z==1
    vnew = v;

    %k: posicion a partir de la que cambiamos componentes
    k = 1+ceil(rand*(M-2));

    %h: valor que sumamos o restamos a las componentes
    h = rand*(v(1)-v(M));
    if rand>0.5
        h=-h;
    end

    %Actualizamos el vector
    for i=k:M-1
        vnew(i) = vnew(i)-h;
    end

    %Comprobar si el vector es descendente
    z = 0;
    for i=1:M-1
        if vnew(i)<vnew(i+1)
            z = 1;
        end
    end
end
end

```

A.6 Función SA no aleatoriedad

En esta sección, se desarrolla el nuevo código "SA" utilizado en el caso de restar aleatoriedad al método.

La diferencia con el anterior algoritmo Simulated Annealing está en no permitir que varíe el vector de diámetros considerado óptimo hasta que no exista algún otro que mejore la función objetivo. Por tanto, se retiran las líneas en las que se comparaban los valores de r y p .

Código A.8 Programa SA no aleatoriedad.

```
function [d_opt,f_opt]=SA(d0)
T0 = 1;
gamma = 0.995;
Tmin = 1e-200;
T = T0;

d_old = d0;

deltaf = 1;
tol = 1e-4;
while T>Tmin || abs(deltaf)>tol
    %Calculamos nuevo d
    d = randomiz(d_old);

    %Calculamos el incremento de funcion
    f_d0 = funsd(d_old);
    f_d = funsd(d);
    deltaf = f_d-f_d0;

    %Aceptamos si es mejor
    if deltaf<=0
        d_old = d;
        d_opt = d;
        f_opt = fun(d_opt);
    end
    T = gamma*T;
end
end
```

En caso de incluir el factor ϕ para las tensiones, se utilizarían los programas "funphi" y "funsdphi".

Índice de Figuras

2.1	Proceso de trefilado	4
3.1	Variables de trefilado	9
5.1	Función objetivo para aluminio	23
5.2	Función objetivo para acero	23

Índice de Tablas

5.1	Propiedades del material	17
5.2	Resultados para aluminio	18
5.3	Resultados para acero	18
5.4	Desglose de pasadas para aluminio	18
5.5	Desglose de pasadas para acero	19
5.6	Comprobación de la cota mínima del número de pasadas para el aluminio	19
5.7	Comprobación de la cota mínima del número de pasadas para el acero	20
5.8	Resultados para aluminio (factor ϕ)	20
5.9	Resultados para acero (factor ϕ)	20
5.10	Desglose de pasadas para aluminio (factor ϕ)	21
5.11	Desglose de pasadas para acero (factor ϕ)	21
5.12	Resultados para aluminio (no aleatoriedad)	24
5.13	Resultados para acero (no aleatoriedad)	24
5.14	Resultados para aluminio (no aleatoriedad, factor ϕ)	25
5.15	Resultados para acero (no aleatoriedad, factor ϕ)	25

Índice de Códigos

A.1	Programa principal	29
A.2	Programa SA	30
A.3	Programa fun	31
A.4	Programa funphi	32
A.5	Programa funsd	32
A.6	Programa funsdphi	32
A.7	Programa randomiz	33
A.8	Programa SA no aleatoriedad	34

Bibliografía

- [1] G. Celano, S. Fichera, L. Fratini and F. Micari, “The application of AI techniques in the optimal design of multi-pass cold drawing processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, pp. 680-685, 2001
- [2] Xin-She Yang, *Engineering Optimization. An Introduction with Metaheuristic Applications*. John Wiley and Sons, 2010
- [3] Mikell P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley and Sons, 2010
- [4] K. Lange, *Handbook of metal forming*. Society of Manufacturing Engineers, 1985
- [5] John A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*. McGraw-Hill, 1999
- [6] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing, Engineering and Technology*. Pearson Education South Asia Pte Ltd., 2014