



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL: Disseny i validació d'un equip de trefilat en calent de fil d'alumini per a impressió 3D.

AUTORS: GUISADO CORCOLL, ENRIC

DATA DE PRESENTACIÓ: JULIOL, 2023

RESUM

L'objectiu principal d'aquest projecte és dissenyar i validar un sistema que permeti el trefilatge de fil d'alumini a temperatures compres entre 25°C i 405°C. El filament resultant estarà destinat a la fabricació additiva, en concret la impressió 3D. Tanmateix, l'equip està ideat per a realitzar produccions a nivell de laboratori.

Un cop dissenyat l'utilitatge, en properes etapes es voldrà obtenir un filament de 1,75 mm de diàmetre amb l'aliatge d'alumini A356 obtingut amb estructura globular per la tècnica "Sub-Liquidus Casting".

Al llarg d'aquest projecte es pot trobar el desenvolupament teòric entorn als processos de deformació plàstica i un aprofundiment en el procés de trefilatge. A més, s'estudien els diferents mètodes d'impressió 3D existents per a aquesta família de materials.

Es realitzaran càlculs i simulacions per al dimensionament de l'equip amb l'objectiu d'aconseguir un disseny òptim i versàtil per a poder complir l'objectiu principal. Aquest equip estarà dissenyat per a ser utilitzat amb una màquina universal de tracció/compressió, encarregada d'aplicar l'esforç de tracció per al trefilatge, i un bobina de forn d'inducció, la qual serà l'encarregat d'escalfar les zones que requereixin temperatura.

L'equip constarà d'un utilitatge que permeti l'allotjament d'una filera, així com també, permeti l'escalfament del material a trefilar. El disseny i les simulacions es duran a terme amb el programari Solidworks i els equips que s'utilitzaran per dimensionar el sistema són: la màquina de tracció Zwick Z100 TL3-S i el forn d'inducció AMBRELL Ekoheat.

Paraules clau (màxim 10):

Trefilatge	Deformació Plàstica	Fabricació Additiva	Aliatges d'Alumini
Disseny	Simulació	Filera	Fil

ABSTRACT

The main objective of this project is to design and validate a system that allows the drawing of aluminium wire at temperatures ranging from 25°C to 405°C. The resulting filament will be intended for additive manufacturing, specifically 3D printing. However, the equipment is designed for laboratory-scale productions.

Once the tooling is designed, in the following stages, the aim is to obtain a 1.75 mm in diameter filament made from A356 aluminium alloy obtained with a globular structure using the "Sub-Liquidus Casting" technique.

Throughout this project, theoretical development regarding plastic deformation processes and an in-depth analysis of the wire drawing process can be found. Additionally, different existing 3D printing methods for this family of materials are being studied.

Calculations and simulations will be carried out for the sizing of the equipment with the aim of achieving an optimal and versatile design to fulfil the main objective. This equipment will be designed to be used with a universal tensile/compression testing machine, responsible for applying the tensile force for the wire drawing, and an induction heating coil, which will be responsible for heating the required areas.

The equipment will consist of a tooling that allows for the housing of a wire die and also enables the heating of the material to be drawn. The design and simulations will be carried out using Solidworks software, and the equipment that will be used to dimension the system are going to be the Zwick Z100 TL3-S tensile testing machine and the AMBRELL Ekoheat induction furnace.

Keywords (10 maximum):

Wire Drawing	Plastic Deformation	Additive Manufacturing	Aluminium Alloys
Design	Simulation	Drawing Die	Filament

SUMARI

INTRODUCCIÓ	8
1. ESTAT DE L'ART PROCESSOS DE DEFORMACIÓ PLÀSTICA	9
1.1 INTRODUCCIÓ ALS PROCESSOS DE DEFORMACIÓ PLÀSTICA	9
1.1.1 ENDURIMENT PER DEFORMACIÓ	10
1.1.2 EFECTE DE LA TEMPERATURA EN ELS PROCESSOS DE DEFORMACIÓ PLÀSTICA	11
1.1.3 DIRECCIONALITAT DE LES PROPIETATS (Callister, 2020)	11
1.2 INTRODUCCIÓ AL PROCÉS DE TREFILAT	13
1.2.1 DEFINICIÓ	13
1.2.2 HISTÒRIA DEL TREFILATGE	14
1.2.3 ELEMENTS PRINCIPALS D'UNA TREFILADORA (Cuascota, 2021).....	15
1.2.4 CLASSIFICACIÓ DE MÀQUINES DE TREFILATGE (Urrutiko, 2016)	17
1.2.4.1 TREFILADORES SIMPLES.....	17
1.2.4.2 TREFILADORES MÚLTIPLES	17
1.2.4.2.1 TREFILADORES MÚLTIPLES D'ACUMULACIÓ	18
1.2.4.2.2 TREFILADORES MÚLTIPLES CONTÍNUES.....	19
1.2.4.2.3 TREFILADORES MÚLTIPLES COMPENSADES	19
1.2.4.3 BANCS D'ESTIRAT DE BARRES	20
1.2.5 CLASSIFICACIÓ DEL PROCÉS SEGONS LES CONDICIONS (Cuascota, 2021)	21
1.2.5.1 TREFILATGE EN FRED	21
1.2.5.2 TREFILATGE EN CALENT	21
1.2.5.3 TREFILATGE EN SEC	21
1.2.5.4 TREFILATGE EN HUMIT O LUBRICADES	22
1.2.6 PASSOS PREVIS AL PROCÉS DE TREFILAT.....	22
1.2.6.1 PREPARACIÓ DE SUPERFÍCIE.....	22
1.2.6.2 ENFILAR LA MÀQUINA(Porta, 2010)	23
1.2.7 MATERIALS PER AL TREFILAT	25
1.2.7.1 PROPIETATS MECÀNIQUES DELS MATERIALS (Rodríguez, 2017)	25

1.2.7.1.1 RESISTÈNCIA A TRACCIÓ	25
1.2.7.1.2 LÍMIT ELÀSTIC O DE FLUÈNCIA	25
1.2.7.1.3 DURESA	26
1.2.7.1.4 DUCTILITAT	27
1.2.7.1.5 ENDURIMENT PER DEFORMACIÓ EN FRED O ACRITUD	27
1.2.7.2 TRACTAMENTS TÈRMICS(Rodríguez, 2017).....	28
1.2.7.2.1 RECUITA	29
1.2.8 PARÀMETRES INFLUENTS EN EL PROCÉS DE TREFILAT (Rodríguez, 2017)	31
1.2.8.1 FREGAMENT	32
1.2.8.2 LUBRICACIÓ	33
1.2.8.3 TEMPERATURA	34
1.2.8.4 VELOCITAT	35
1.2.9 TEMPERATURA DE TREBALL	37
1.2.10 MECÀNICA DEL TREFILATGE (Kalpakjian, 2008)	38
1.2.10.1 OBTENCIÓ TENCIÓ DE FLUÈNCIA MITJANA	39
1.3 TECNOLOGIES DE FABRICACIÓ ADDITIVA	41
1.3.1 IMPRESSIÓ 3D (Gibson, 2021).....	41
1.3.2 TÈCNiques DE IMPRESSIÓ 3D DE METALLS (Aboulkhair, 2019)	41
1.3.3 IMPRESSIÓ 3D PER FDM (FUSED DEPOSITION MODELLING).....	43
2. DISSENY I DIMENSIONAT D'UNA MATRIU DE TREFILAT	45
2.1 DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES PEL DISSENY	45
2.2 MATERIAL A TREFILAR	51
2.3 CÀLCUL TENSIÓ I FORÇA DE TREFILATGE.....	53
2.4 INNOVACIÓ	57
2.5 RECURSOS DISPONIBLES.....	58
2.6 DISSENY CONCEPTUAL DE L'UTILLATGE	60
2.7 DISSENY DE L'UTILLATGE	63
2.8 CÀLCULS	66
2.8.1 CONDICIONS LÍMIT	66

2.8.2 CÀLCUL ÀREA MÍNIMA PER A ESFORÇ A TRACCIÓ LÍMIT	66
2.9 VALIDACIÓ	68
2.9.1 VALIDACIÓ SECCIÓ MÍNIMA RESISTENT	68
2.9.2 SIMULACIONS	69
2.9.2.1 SIMULACIÓ CONDICIONS NORMALS	70
2.9.2.2 SIMULACIÓ CONDICIONS LÍMIT	73
2.10 FABRICACIÓ DELS ELEMENTS	77
2.11 ETAPES DEL PROCÉS	78
2.12 PRESSUPOST	82
2.12.1 COSTOS D'ENGINYERIA	82
2.12.2 COSTOS DELS RECURSOS	82
2.12.3 COSTOS DE FABRICACIÓ	83
CONCLUSIONS	85
AGRAÏMENTS	87
BIBLIOGRAFIA	88
ANNEX I: PLÀNOLS	92

SUMARI DE FIGURES

FIGURA 1. ESQUEMA DELS PROCESSOS DE DEFORMACIÓ PLÀSTICA	9
FIGURA 2. GRÀFIC DE L'ENDURIMENT PER DEFORMACIÓ EN DIFERENTS ETAPES	10
FIGURA 3. REPRESENTACIÓ TRANSVERSAL D'UNA FILERA AMB FIL TRAVESSANT-LA	13
FIGURA 4. RESTES ARQUEOLÒGIQUES DE FILERES I DESCRIPCIÓ GRÀFICA DEL PROCÉS	14
FIGURA 5. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE LES PARTS PRINCIPALS D'UNA MÀQUINA TREFILADORA	15
FIGURA 6. REPRESENTACIÓ TRANSVERSAL DE LES DIFERENTS SECCIONS D'UNA FILERA	16
FIGURA 7. BANC DE TREFILAT MÚLTIPLE	18
FIGURA 8. BANC DE TREFILAT MÚLTIPLE D'ACUMULACIÓ	19
FIGURA 9. BANC DE TREFILADORES MÚLTIPLES CONTÍNUES	19
FIGURA 10. BANC DE TREFILADORES MÚLTIPLES COMPENSADES	20
FIGURA 11. BANC D'ESTIRAT DE BARRES	20
FIGURA 12. BANC DE TREFILATGE EN HUMIT	22
FIGURA 13. MÀQUINA EMPRADA PER A REALITZAR DECAPATS MECÀNICS	23
FIGURA 14. MÀQUINA EMPRADA PER SOLDAR DOS EXTREMS DE FIL METÀL·LIC	24
FIGURA 15. MÀQUINA LAMINADORS D'EXTREMS DE FIL	24
FIGURA 16. GRÀFIC COMPARATIU DEL LÍMIT ELÀSTIC, LA RESISTÈNCIA A TRACCIÓ I L'ELONGACIÓ EN FUNCIÓ DEL PERCENTATGE DE TREBALL EN FRED	28
FIGURA 17. BOBINES DE FIL ESSENT TRACTADES TÈRMICAMENT	30
FIGURA 18. RELACIONS ENTRE ELS DIFERENTS PARÀMETRES QUE INTERVENEN EN EL TREFILAT	36
FIGURA 19. EVOLUCIÓ RESISTÈNCIA A TRACCIÓ EN FUNCIÓ DE LA TEMPERATURA DE L'ALITATGE ALCU4MG1	37
FIGURA 20. REPRESENTACIÓ ESQUEMÀTICA DE LA DEFORMACIÓ INTERNA QUE PATEIX UN FIL AL SER TREFILAT	39
FIGURA 21. ESQUEMA DEL ANÀLISI LOCAL DE TENSIONS EN EL TREFILATGE.	40
FIGURA 22. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DEL SISTEMA SLM	42
FIGURA 23. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DEL PROCÉS DED	42
FIGURA 24. REPRESENTACIÓ GRÀFICA MÈTODE FDM	43
FIGURA 25. DIMENSIONS DE FILERA ESTEVES GROUP DE DIAMANT POLICRISTAL·LÍ	46
FIGURA 26. EXEMPLAR MOLYKOTE G-RAPID PLUS	47
FIGURA 27. EFECTE DE LA TEMPERATURA AL LÍMIT ELÀSTIC EN AISI H13	50
FIGURA 28. MÀQUINA PER ASSAJOS DE TRACCIÓ ZWICK Z100 TL-3S	58
FIGURA 29. FORN D'INDUCCIÓ AMBRELL EKOHEAT 30/100	59
FIGURA 30. UNIÓ INFERIOR PER A UTILLATGES I PASSADOR DE LA MÀQUINA DE TRACCIÓ ZWICK	60
FIGURA 31. MORDASSA SUPERIOR PRÒPIA MÀQUINA DE TRACCIÓ ZWICK	61
FIGURA 32. REPRESENTACIÓ GRÀFICA COMPONENTS PRODUCTE FINAL	62
FIGURA 33. REPRESENTACIÓ GRÀFICA PROCÉS DE TREFILAT	62
FIGURA 34. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DIMENSIONS MÀQUINA DE TRACCIÓ ZWICK	64
FIGURA 35. REPRESENTACIÓ GRÀFICA ESCLATAT PECES DE L'UTILLATGE PER AL TREFILAT	64
FIGURA 36. REPRESENTACIÓ GRÀFICA UTILLATGE, CORONA I FILERA	65
FIGURA 37. REPRESENTACIÓ GRÀFICA UTILLATGE MUNTAT	65
FIGURA 38. REPRESENTACIÓ GRÀFICA ÀREA CRÍTICA	68
FIGURA 39. MALLAT ELEMENT A SIMULAR	69
FIGURA 40. REPRESENTACIÓ PUNTS DE SUBJECCIÓ ELEMENT A SIMULAR	70
FIGURA 41. PROPIETATS AISI H13 A TEMPERATURA AMBIENT	70
FIGURA 42. DISTRIBUCIÓ FORÇA DE TREFILAT EN CONDICIONS NORMALS	71
FIGURA 43. SIMULACIÓ TENSIONS UTILLATGE EN CONDICIONS NORMALS	72
FIGURA 44. DETALL SIMULACIÓ TENSIONS UTILLATGE EN CONDICIONS NORMALS	72
FIGURA 45. SIMULACIÓ DEFORMACIONS UTILLATGE EN CONDICIONS NORMALS	73
FIGURA 46. PROPIETATS AISI H13 A 500°C	73
FIGURA 47. DISTRIBUCIÓ FORÇA DE TREFILAT EN CONDICIONS LÍMIT	74
FIGURA 48. SIMULACIÓ TENSIONS UTILLATGE EN CONDICIONS LÍMIT	75
FIGURA 49. DETALL SIMULACIÓ TENSIONS UTILLATGE EN CONDICIONS LÍMIT	75
FIGURA 50. SIMULACIÓ DEFORMACIONS UTILLATGE EN CONDICIONS LÍMIT	76
FIGURA 51. REPRESENTACIÓ GRÀFICA SECCIÓ UTILLATGE I TRAMS A MODIFICAR DEL FIL	78
FIGURA 52. REPRESENTACIÓ GRÀFICA UNIÓ INFERIOR, UTILLATGE I PASSADOR	79

FIGURA 53. REPRESENTACIÓ GRÀFICA UTILLATGE MUNTAT SOBRE UNIÓ INFERIOR AMB PASSADOR COL-LOCAT	79
FIGURA 54. REPRESENTACIÓ GRÀFICA SECCIÓ UTILLATGE PREPARAT PER AL TREFILATGE	80
FIGURA 55. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DETALL SECCIÓ UTILLATGE PREPARAT PER AL TREFILATGE	81

SUMARI DE TAULES

TAULA 1. AVANTATGES E INCONVENIENTS DE L'EFECTE DE LA TEMPERATURA EN EL MATERIAL I EL PROCÉS (MARTÍN, 2021)	12
TAULA 2. TAULA COMPARATIVA DELS COEFICIENTS DE FRICCIÓ EN FUNCIÓ DELS LUBRICANTS USATS (SCHEY, 2002)	34
TAULA 3. TAULA COMPARATIVA ENTRE LES RESISTÈNCIES A TRACCIÓ DELS DIFERENTS MATERIALS I LES VELOCITATS DE TREBALL (TSCHAETSCH, 2006)	36
TAULA 4. RANGS DE TEMPERATURES DE TREBALL PER AL TREFILAT	48
TAULA 5. TAULA DE DIÀMETRES DE CADA PAS AMB PERCENTATGES DE ALLARGAMENT I REDUCCIÓ DE SECCIÓ.	49
TAULA 6. COMPOSICIÓ QUÍMICA EN % EN PES DE L'ALITATGE A356 (GEETHA, 2014)	51
TAULA 7. PROPIETATS MECÀNIQUES DE L'ALITATGE A356 SLC A DIFERENTS VELOCITATS D'ASSAIG (MENARGUES, 2011)	52
TAULA 8. DIÀMETRES INICIALS I FINALS PER A CADA PAS DEL PROCÉS I QUOCIENT FRACCIONAL (R)	53
TAULA 9. TAULA DE CÀLCUL DE LA TENSIÓ DE FLUËNCIA MITJA PER A CADA PAS DEL PROCÉS EN FUNCIÓ DE LA VELOCITAT D'ASSAIG PER A L'OBTENCIÓ DE LES PROPIETATS MECÀNIQUES	54
TAULA 10. TENSIONS DE TREFILAT PER A $Y = 299 \text{ MPa}$	55
TAULA 11. TENSIONS DE TREFILAT PER A $Y = 337 \text{ MPa}$	55
TAULA 12. TENSIONS DE TREFILAT PER A $Y = 378 \text{ MPa}$	55
TAULA 13. FORCES DE TREFILAT OBTINGUDES A PARTIR DE LES DIFERENTS TENSIONS DE TREFILAT	56
TAULA 14. CONDICIONS LÍMIT A LES QUE L'UTILITATGE POT ESTAR SOTMÈS	66
TAULA 15. DESGLOSSAMENT COSTOS D'ENGINYERIA	82
TAULA 16. COST MATÈRIA PRIMERA PER A FABRICAR ELS COMPONENTS	83
TAULA 17. COSTOS MATERIAL FUNGIBLE I MATERIAL PER A DESENVOLUPAR EL PROJECTE	83
TAULA 18. COSTOS DE FABRICACIÓ DELS COMPONENTS	83
TAULA 19. DESGLOSSAMENT COSTOS I PREUS TOTALS DEL PROJECTE	84

GLOSSARI DE SIGNES, SÍMBOLS, ABREVIATURES, ACRÒNIMS I TERMES

CDAL: Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i Tractaments de Superfície

UPC: Universitat Politècnica de Catalunya

PBF: Powder Bed Fusion

SLM: Selective Laser Melting

EBM: Electron Beam Melting

DED: Directed Energy Deposition

DoD: Drop on Demand

FDM: Fused Deposition Modelling

MEF: Mètode d'Elements Finites

ABREVIATURES

d_0	Diàmetre inicial del fil
d_i	Diàmetre final del fil
A_0	Àrea inicial del fil o secció inicial
A_i	Àrea final del fil o secció final
K	Constant
n	Coefficient d'enduriment per deformació
Y	Tensió de fluència
\bar{Y}	Tensió de fluència mitjana
α	Angle d'atac de la filera
μ	Coefficient de fregament
v	Velocitat de trefilatge o velocitat d'assaig
E	Mòdul de Young
$Rp_{0,2}$	Tensió de límit elàstic
Rm	Tensió de ruptura o resistència a la tracció
ε	Allargament
$\Delta S \%$	Percentatge de reducció de secció
$\Delta l \%$	Percentatge d'allargament del fil
σ_t	Tensió de trefilat
F_t	Força de trefilat
r	Reducció fraccional d'àrea
#	Nombre de pas del procés
T_a	Temperatura ambient
T_f	Temperatura de fusió

INTRODUCCIÓ

Aquest projecte neix de la necessitat de crear filament d'alumini per al projecte de desenvolupament d'una impressora 3D de metalls, del qual el CDAL (Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i Tractaments de Superfície) n'és partícip. Aquest filament d'alumini s'ha d'obtenir a partir de l'aliatge d'alumini A357 amb estructura globular obtingut per la tècnica "Sub-Liquidus Casting", el qual també ha estat desenvolupat per al mateix grup d'investigació.

Com que l'objectiu principal és l'obtenció d'aquest filament caldrà treballar en el desenvolupament i validació d'un equip de trefilat en calent per a l'obtenció d'aquest filament, per temperatures compreses entre T_a (25°C) i $0,7 T_f$ (405°C).

Primer de tot caldrà realitzar un estudi teòric entorn els processos de deformació plàstica dels metalls i un aprofundiment en procés de trefilatge i el trefilat en calent. Conèixer l'estat de la tècnica serà útil de cares al disseny del procés. Seguidament caldrà assolir conceptes relacionats amb la fabricació additiva i, també, conceptes relacionats amb la impressió 3D de metalls. Conèixer els requeriments i necessitats d'ambdós processos serà imprescindible per al desenvolupament de l'equip en qüestió. Estudiar l'aliatge a trefilar serà necessari per a poder dimensionar tots els equips necessaris. Finalment, caldrà tenir constància de quins recursos disposa la universitat i, en concret, el grup d'investigació per a la materialització del producte desenvolupat.

Després d'haver construït una base teòrica entorn al procés de trefilatge es procedirà al desenvolupament de l'equip. Per a això caldrà dissenyar tots els elements imprescindibles per a dur a terme el procés i que compleixin els requisits imposats per al producte que es vol obtenir. El disseny de components inclou el dimensionament, el càlcul de les interaccions entre ells i l'elecció dels materials amb el qual es fabricaran. A més, es realitzaran simulacions per a entendre d'una forma més realista les conseqüències que tindran lloc en tots i cadascun dels elements. Per últim, es realitzaran els plànols constructius necessaris per a materialitzar l'equip.

1. ESTAT DE L'ART PROCESSOS DE DEFORMACIÓ PLÀSTICA

1.1 INTRODUCCIÓ ALS PROCESSOS DE DEFORMACIÓ PLÀSTICA

Els processos de deformació plàstica consisteixen en deformar de forma permanent un material per tal que aquest obtingui una forma en concret. Son processos no reversibles ja que s'està deformant plàsticament el material i, per tant, no hi ha retorn a l'estat inicial de la peça. (Askeland, 2017)

En concret, treballen per sobre de les tensions de límit elàstic però per sota de les tensions màximes. Fóra bo comentar que tots aquests parteixen de productes semielaborats com podrien ser: barres, planxes, etc.

Les etapes que segueixen la majoria de processos de deformació plàstica són les següents (Martín, 2021):

1. Entrada de la matèria prima en forma de productes semielaborats.
2. Deformació plàstica massiva on es superen les tensions al límit elàstic. Aquesta etapa pot succeir múltiples vegades en funció de les necessitats del procés i de l'acabat desitjat de la peça final.
3. Sortida del producte elaborat o semielaborat preparat per a processos següents.

De processos de deformació plàstica en trobem 3 tipus (Martín, 2021):

1. Màssics: forja, laminació, trefilat i extrusió.
2. De xapa: plegat, estirat, cisellat.
3. Mixtes: embotició.

En la Figura 1, es mostra un esquema explicatiu de cadascun dels processos.

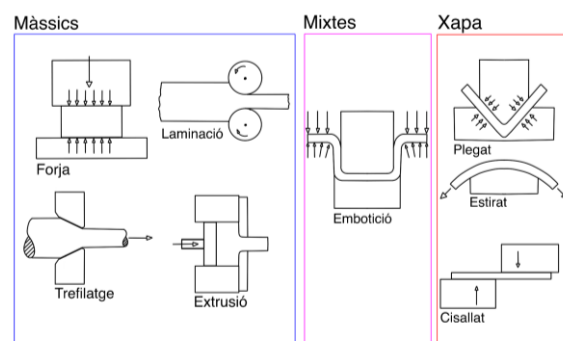


Figura 1. Esquema dels processos de deformació plàstica

(Font: Elaboració pròpia)

1.1.1 ENDURIMENT PER DEFORMACIÓ

Al deformar plàsticament un material es produeix una modificació tan en la microestructura com en la macroestructura d'aquest a causa de l'augment de la densitat de dislocacions. Sovint, els grans del material s'allarguen i la superfície obté una textura diferent (Martín, 2021).

A més, el material pateix un fenomen anomenat acritud o enduriment per deformació. Aquest fet consisteix en l'enduriment del material i un increment de la rigidesa, fet que suposa una reducció de la ductilitat. L'augment de les dislocacions provoca el bloqueig entre grans del material. Els cicles successius de deformació endureixen el material, tornant-lo més fràgil. (Callister, 2020)

Tal i com es pot observar en el gràfic a continuació (Figura 2), l'augment de la deformació provoca un estrenyiment de l'àrea sota la corba i un augment de la pendent del límit elàstic. (Martín, 2021) Això significa que cada vegada es deformarà menys el material i esdevindrà més fràgil.

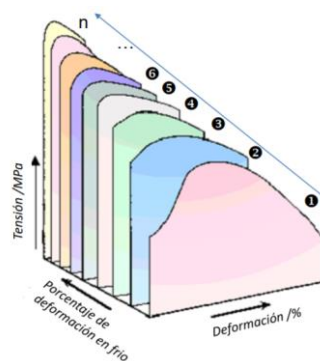


Figura 2. Gràfic de l'enduriment per deformació en diferents etapes

(Font: (Martín, 2021))

Així com la llei de Hooke s'utilitza per descriure la relació entre tensions i deformacions en el camp elàstic, la llei de Hollomon (Eq. 1) descriu aquesta mateixa relació però en el camp plàstic. (Kalpakjian, 2008)

$$\sigma_p = K \cdot \varepsilon^n \quad \text{Eq. 1}$$

El factor de potència n es coneix com a coeficient d'acritud o coeficient d'enduriment per deformació. A més, ens permet caracteritzar un material analitzant el seu comportament davant la deformació. Fóra bo comentar que el valor de n pot canviar per un mateix material en funció de l'estat metal·lúrgic en el que es troba, és a dir, si ha patit algun tractament o no. (Kalpakjian, 2008)

1.1.2 EFECTE DE LA TEMPERATURA EN ELS PROCESSOS DE DEFORMACIÓ PLÀSTICA

La conformabilitat d'una peça es pot veure afectada per les temperatures del procés i les velocitats d'aplicació de les càrregues.

Un augment de la temperatura durant el procés de deformació augmenta la ductilitat del material i, per tant, es requereix menys esforç per a deformar ja que disminueix el límit elàstic del mateix. Un augment de la velocitat d'aplicació de les càrregues disminueix la ductilitat i n'augmenta la resistència. (Kalpakjian, 2008)

Existeixen tres tipus de processos de deformació en funció de la temperatura a la que es realitzen. (Martín, 2021)

1. En fred: es realitza la deformació per sota la temperatura de cristal·lització. Es sol treballar com a màxim a un 30% de la temperatura de fusió.
2. En tebi: es realitza la deformació per sobre la temperatura de cristal·lització i es sol treballar entre un 30% i 60% de la temperatura de fusió.
3. En calent: es realitza la deformació per sobre la temperatura de cristal·lització i es sol treballar per sobre del 60% de la temperatura de fusió sense arribar a fondre el material. Existeix una variant d'aquest tipus anomenada conformat isotèrmic. Aquesta consisteix en deformar el material a la mateixa temperatura a la qual es troba la matriu.

Tant en el treball en tebi com en calent existeix la possibilitat de que no aparegui acritud en el material ja que en ambdós casos s'està treballant per sobre a la temperatura de cristal·lització. (Martín, 2021)

1.1.3 DIRECCIONALITAT DE LES PROPIETATS (CALLISTER, 2020)

Al estar deformant el material s'està deformant l'estructura interna i, per tant, en el cas dels metalls els grans deixen de ser equiaxials i passen a tenir una geometria més allargada. Aquest fet suposa un canvi en l'estructura i conseqüentment les propietats del material varien segons la direcció. A causa de la deformació, les peces passen a ser anisòtropes.

A continuació, en la Taula 1, es pot trobar una comparació dels diferents mètodes de treball juntament amb els seus avantatges i inconvenients.

Taula 1. Avantatges e inconvenients de l'efecte de la temperatura en el material i el procés (Martín, 2021)

Treball en fred	Treball en tebi	Treball en calent
Avantatges	Avantatges	Avantatges
1. Bons acabats superficials i toleràncies 2. Increment de la resistència per deformació	1. Forces menors 2. Es disminueix l'enduriment per deformació 3. Obtenció de formes més complexes 4. No es necessiten recuites	1. Forces menors 2. No hi ha enduriment per deformació (estovament per recristal·lització) 3. Obtenció de geometries més complexes 4. Propietats isotròpiques 5. Possibilitat de deformar materials que en fred trenquen
Inconvenients	Inconvenients	Inconvenients
1. Necessitat de forces elevades 2. L'enduriment limita la deformació 3. Necessitat de recuita	1. Necessitat de més energia en el procés	1. Necessitat de molta energia per a l'escalfament del material i els utillatges 2. Pitjor acabat superficial 3. Limitació de vida dels utillatges.

1.2 INTRODUCCIÓ AL PROCÉS DE TREFILAT

1.2.1 DEFINICIÓ

En el camp de l'enginyeria el procés de trefilatge en fred és un procés mecànic de molta importància industrial. Aquest pot treballar amb diversos materials, com per exemple: acers de baix contingut de carboni, alumini, coure, etc. En general, materials amb bona ductilitat. (Martín, 2021)

El trefilatge consisteix en fer passar un material metàl·lic, filferro o barra de secció circular a través d'un dau o filera de trefilat, amb la finalitat d'obtenir una reducció de la secció transversal, aconseguint amb això que l'esforç inicial al qual està sotmès el fil excedeixi la resistència a fluència del material per tal de ocasionar una deformació permanent en el material. (Askeland, 2017)

Amb altres paraules, es tracta de reduir la secció d'un fil a través de fer-lo passar pel forat de l'eina, anomenada filera, la qual posseeix un diàmetre inferior al del material d'entrada (Figura 3). Aquesta deformació s'aconsegueix a base d'estirar el material des de la sortida de la filera.

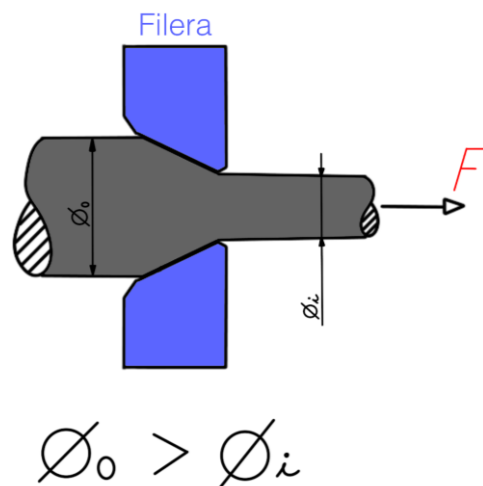


Figura 3. Representació transversal d'una filera amb fil travessant-la

(Font: Elaboració pròpia)

L'eina que s'usa per a dur a terme la reducció de diàmetre és la filera o dau. Aquesta eina, en funció de la seva finalitat, pot estar feta de diferents materials. Per exemple, per a realitzar filferros tous, solen ser d'acers aliats i per a filferros durs carburs de tungstè (WC), igual que les eines de mecanitzat, o, inclús, diamant per a productes molt fins. (Porta, 2010)

El volum de material es manté constant en tot el procés de deformació. És per això que a la sortida s'obté un diàmetre menor de filferro però de més longitud i viceversa.

El procés de trefilat altera les propietats mecàniques i la microestructura del material deformat. Això es deu a que aquest es troba sotmès a càrregues de tracció i compressió. Aquests esforços aplicats augmenten la duresa del material provocant-li major resistència a ser deformat. Tal i com s'ha esmentat anteriorment, aquest procés també provoca l'aparició d'acritud en els productes que se'n obtenen. És per això que en molts casos pot ser necessari un procés de recuita per estovar el material i fer una recristal·lització del mateix. (Porta, 2010)

Així doncs, el procés de trefilatge comença amb un material primari, generalment una barra rodona o un fil gruixut, que és passat a través de la primera filera, que és la de major diàmetre. A continuació, el material es va passant a través de fileres de diàmetres cada cop més petits fins a obtenir la secció final desitjada.

1.2.2 HISTÒRIA DEL TREFILATGE

El trefilatge és un procés de fabricació que s'ha utilitzat durant segles per produir filferros i altres productes metàl·lics. La història del procés es remunta a l'època medieval, tot i que els mètodes i eines utilitzats per aquells temps eren molt més primitius que els actualment coneguts. S'han fet algunes troballes arqueològiques de les primeres eines de trefilat, com les que s'observen en la figura X. Aquestes van ser trobades en tombes de personatges històrics a Zambia (Figura 4). (Garenne-Marot, 2019)



Figura 4. Restes arqueològiques de fileres i descripció gràfica del procés

(Font: (Garenne-Marot, 2019))

Durant l'edat mitjana, el trefilatge s'utilitzava principalment per produir filferros per a la fabricació de joies i altres articles decoratius. En aquella època, el procés de trefilatge es realitzava utilitzant una sèrie de forats de diferents mida en una placa de metall, a través dels quals s'hi passava el material base per tal de reduir el seu diàmetre. A

mesura que es reduïa la secció, el filferro s'anava passant per forats cada vegada més petits. Així doncs van definir el procés bàsic del trefilatge. (Garenne-Marot, 2019)

Passada l'edat mitjana i en concret en el segle XVII, es van desenvolupar les primeres màquines. Aquestes utilitzaven una sèrie de rodets per tal de reduir el diàmetre del filferro d'una forma més ràpida i eficient que en anteriors mètodes. A mitjans del segle XIX, es van introduir màquines de trefilat impulsades per vapor. Fet que va permetre un augment del volum de producció i una reducció dels costos de producció. (Pops, 2018)

En el segle XX, es van desenvolupar noves tècniques de trefilatge, com per exemple, el trefilatge amb lubricació i el trefilatge en calent. El primer consisteix en fer ús d'olis lubricants per tal de reduir significativament la fricció entre el filferro i les eines de trefilatge. El fet d'afegir agents lubricants va suposar un augment de la velocitat de producció i un allargament de la vida útil de les eines de trefilatge. D'altra banda, el trefilatge en calent utilitza temperatures elevades per estovar el metall i, per tant, facilitar la seva deformació. Fet que permet, en molts casos, reduir el diàmetre amb una sola passada.

Actualment, el trefilatge es un procés fonamental en la fabricació de tot tipus de fils i filferros de caràcter metàl·lic. S'utilitza en una àmplia varietat d'indústries, com per exemple, la elèctrica, l'automobilística, l'electrònica, la construcció i la joieria, entre d'altres.

1.2.3 ELEMENTS PRINCIPALS D'UNA TREFILADORA (CUASCOTA, 2021)

A continuació s'exposaran i explicaran els elements principals d'una màquina trefiladora. Els principals elements són: la bancada, l'equip de tracció, el tambor d'alimentació o debanadora, la bobina de sortida i, finalment, la filera o dau (Figura 5).

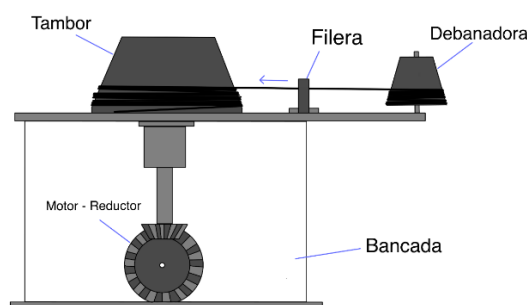


Figura 5. Representació gràfica de les parts principals d'una màquina trefiladora

(Font: Elaboració pròpia)

L'element més bàsic emprat en el procés de trefilatge és la filera o, també anomenada, eina, dau o matriu. Aquest element consta de diferents diàmetres ja que les reduccions de secció no es solen aconseguir amb un sol pas. En la Figura 6, es mostren les principals característiques d'una filera. L'embocadura té un arrodoniment inicial que facilita l'entrada del material base. L'angle d'entrada α és l'obertura de forma cònica i varia entre els 20° i 60° . La secció de reducció té una geometria troncocònica i es la zona on s'aconsegueix la reducció de diàmetre del material i el seu allargament. Aquesta secció té un angle, també conegut com angle d'atac, d'entre 6° i 20° . Seguidament, trobem la zona de calibrat la qual té una forma cilíndrica i és l'encarregada d'ajustar el material a el diàmetre desitjat. Finalment, trobem la sortida, la qual també té forma troncocònica i té un angle que varia entre els 30° i 60° .

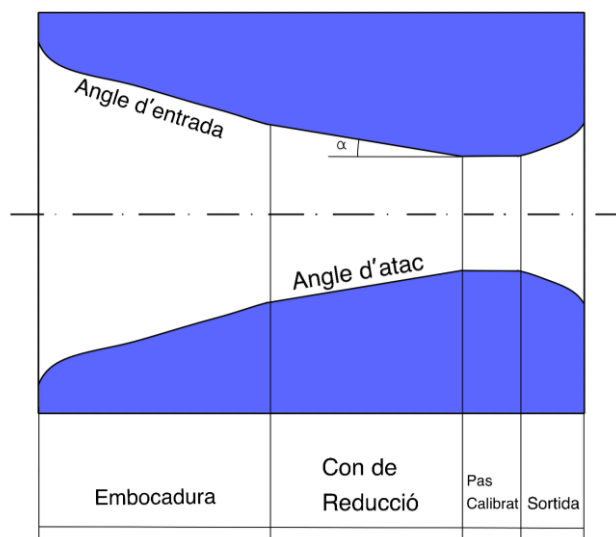


Figura 6. Representació transversal de les diferents seccions d'una filera

(Font: Elaboració Pròpia)

El tambor d'alimentació o debanadora, és l'element que allotja el material el qual es sotmetrà al procés de trefilatge i és l'encarregat de desenrotllar el filferro perquè pugui ser trefilat.

La bobina de sortida és la peça on s'enrotlla el filferro després de haver passat per la filera i, a més, és l'encarregat de traccionar el material.

L'equip de tracció, que sol anar acoblat a la bobina de sortida, és l'encarregat de produir la força necessària per a provocar la deformació plàstica del material.

Per últim, la bancada és aquell element que allotja tots els components de la màquina i els manté fixes.

1.2.4 CLASSIFICACIÓ DE MÀQUINES DE TREFILATGE (URRUTIKO, 2016)

La majoria de màquines dedicades al trefilatge en el mercat estan exclusivament destinades a la producció industrial. Hi ha diversos tipus de màquines de trefilat utilitzades per reduir el diàmetre de filferros i altres productes de metall. Els tipus més comuns segons l'estructura del procés són:

1.2.4.1 TREFILADORES SIMPLS

Les trefiladores simples estan compostes per una sola filera, un tambor d'alimentació, un tambor de sortida i un equip de tracció. Aquestes màquines estan destinades a la producció de filferros de tot tipus ja que pot variar la geometria d'aquestes.

1.2.4.2 TREFILADORES MÚLTIPLES

Els bancs de trefilat de filferro estan destinats a la fabricació de filferros amb una secció de fins a 10 mm i amb un resultat amb una gran diferència de diàmetre. Per a aconseguir-ho es disposen un gran nombre de màquines en sèrie, tal i com es pot veure en la Figura 7, les quals permeten aconseguir grans reduccions en un sol procés.

El material base són tambors de filferro els quals permeten que la producció no s'aturi fins que el tambor no hagi quedat buit. El producte final queda recollit de la mateixa manera que el material base, en forma de bobina.

La força de tracció ve donada per la fricció entre el filferro i els tambors intermedis, és a dir, tots els tambors de sortida esdevenen alhora tambors tractors excepte l'últim de tots el qual només recull el producte final. Cal que el filferro doni les voltes suficients a cada tambor per tal que hi hagi la força de fregament necessària que permeti traccionar el material.



Figura 7. Banc de trefilat múltiple

(Font: <https://www.wire-drawing-machinery.cn/sp/product/welding-wire-drawing-machine/co2-welding-cable-wire-drawing-machine.html>)

Per a poder començar la producció cal una llarga preparació, ja que cal enfilat cada filera amb cada bobina tenint en compte les reduccions de diàmetre. Sovint, es solda un cable entre cada pas de reducció amb l'anterior per a facilitar l'enfilat de la màquina. Amb altres paraules, entre cada filera i bobina es solda un cable el qual també s'enrotlla a aquesta. Per tal d'evitar aquest pas més cops, un cop s'acaba el material base es solda una nova bobina a l'extrem final de l'anterior. D'aquesta manera ja queda enfilada una nova bobina i no s'ha de tornar a repetir tram per tram.

A causa del fregament sovint la temperatura, tant de la filera com dels tambors, augmenta. És per aquest motiu que aquestes màquines duen un sistema de refrigeració per tal de reduir la temperatura dels utilatges i allargar-ne així la vida útil. És evident que per a la producció continuada es necessita refrigerar les fileres però els tambors també ho requereixen ja que així s'afavoreix la transmissió de la força de estirat per fricció.

Fóra bo comentar que cada tambor disposa del seu propi motor per tal de proporcionar la tensió necessària i un fre per poder realitzar parades controlades sense que es produeixi un trencament del filferro.

1.2.4.2.1 TREFILADORES MÚLTIPLES D'ACUMULACIÓ

En aquestes màquines les velocitats de les bobines no estan calculades per absorbir l'augment de longitud del fil. Per tant, en cada bobina té lloc l'acumulació de material abans de passar per la següent filera (Figura 8).



Figura 8. Banc de trefilat múltiple d'acumulació

(Font: (Urrutiko, 2016))

Aquestes màquines tenen una gran avantatge respecte les altres. En cas de trencament del fil, no fa falta parar tot el procés, només cal tornar a soldar en el punt de trencament i reiniciar de nou la producció. (Porta, 2010)

1.2.4.2.2 TREFILADORES MÚLTIPLES CONTÍNUES

En aquest tipus de màquines també es disposa de múltiples bobines però les velocitats estan calculades per absorbir l'augment de la longitud del fil al aprimar-se, per això, cada bobina gira més ràpid que l'anterior. En la Figura 9, es pot veure representada una màquina d'aquestes característiques.



Figura 9. Banc de trefiladores múltiples contínues

(Font: <https://www.tecalsa.eu/es/productos/lineas-de-trefilado/>)

En aquest cas el nombre de voltes de fil que enrotlla cada bobina es manté constant durant tota la operació.

1.2.4.2.3 TREFILADORES MÚLTIPLES COMPENSADAS

Les trefiladores múltiples compensades estan compostes per dues bobines còniques amb canals mecanitzats per on passa el fil (Figura 10). Al disposar d'aquesta geometria

cònica, tot i que la velocitat de gir és la mateixa, a mesura que augmenta el diàmetre s'hi pot enrotllar més quantitat de fil, ja que la seva longitud augmenta a causa de l'estrenyiment de la seva secció.

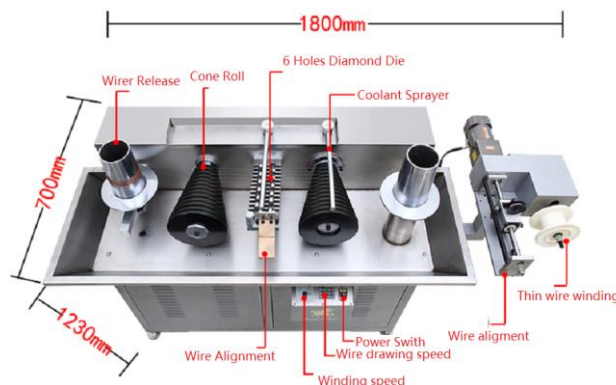


Figura 10. Banc de trefiladores múltiples compensades

(Font: <https://www.mtixtl.com/YLJ-WD-6.aspx>)

1.2.4.3 BANCOS D'ESTIRAT DE BARRES

Aquestes màquines s'empren per a trefilar barres d'una secció mitjana i que poden rondar entre els 2 i 30 metres de longitud. Tot i ser màquines trefiladores, el principal objectiu d'aquestes és millorar les toleràncies dimensionals de les barres i obtenir un millor acabat superficial.

El funcionament d'aquest tipus de màquines és senzill. Es comença per enfilat la màquina, això es fa reduint el diàmetre per mecanitzat de la punta i introduint-la a la filera. Seguidament, i amb una mordassa anomenada "gos", es subjecta l'extrem de la barra. A continuació, i gràcies a la unió entre la mordassa i el carro de tracció, s'estira la barra longitudinalment per tal de produir el trefilatge (Figura 11).

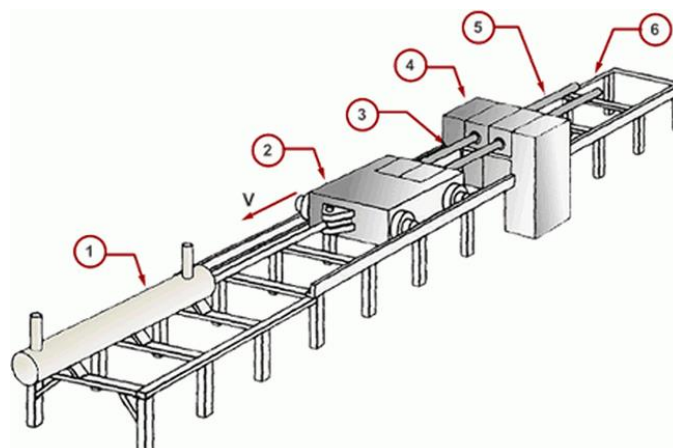


Figura 11. Banc d'estirat de barres

(Font: (Urrutiko, 2016))

El carro de tracció sol estar unit per cadenes a un motor giratori el qual produeix la tensió suficient per al procés o a un pistó el qual també produeix una força de tracció.

En aquest cas la màquina també s'usa per a la producció de tubs però per a aquest fi es necessita fer ús de fileres amb un ajust per a produir el diàmetre desitjat. A més, es sol fer ús de mandrils per a generar el diàmetre intern del tub. Aquests elements poden ser flotants o poden estar subjectes.

1.2.5 CLASSIFICACIÓ DEL PROCÉS SEGONS LES CONDICIONS (CUASCOTA, 2021)

D'altra banda també podem classificar les màquines segons el seu ambient de treball:

1.2.5.1 TREFILATGE EN FRED

La majoria de màquines destinades al trefilatge treballen en fred. Això significa que treballen amb el material a temperatura ambient, és a dir, no s'escalfa ni pateix cap tractament tèrmic durant el procés de trefilatge.

Fóra bo comentar que sovint s'apliquen tractaments tèrmics de recuita per tal de reduir l'acritud generada en la deformació plàstica del material.

1.2.5.2 TREFILATGE EN CALENT

Aquest tipus de màquines utilitzen dispositius que generen temperatures elevades per estovar el metall abans de passar-lo a través de les fileres. Els utilitatges poden disposar de resistències d'escalfament en funció de les necessitats del procés. El fet d'escalfar els utilitatges pot suposar una disminució de la seva vida útil.

El material calent esdevé més fàcil de deformar, cosa que permet una reducció més ràpida del diàmetre i amb la necessitat d'aplicar menys esforç de tracció. El trefilat en calent s'utilitza principalment per a materials que són difícils de deformar en fred, com alguns acers especials.

1.2.5.3 TREFILATGE EN SEC

Les màquines que trefilen en sec són aquelles que no fan ús de líquids refrigerants ni lubricants per a facilitar la deformació. Cal destacar que no són molt comunes ja que desgasten molt els utilitatges i requereixen de més esforç de tracció.

1.2.5.4 TREFILATGE EN HUMIT O LUBRICADES

Aquestes màquines utilitzen olis o emulsions com a lubricants per reduir la fricció entre el material i les eines de trefilat, cosa que permet una major velocitat de producció i una vida útil més llarga de les eines. Tal i com es pot observar en la Figura 12, el fil es banyat per un raig de lubricant des de la part superior.



Figura 12. Banc de trefilatge en humit

(Font: <https://umformtechnik.net/wire/Content/Reports/Next-generation-in-wire-drawing-lubrication>)

Aquests són només alguns exemples dels diferents tipus de màquines de trefilat que hi ha a la indústria. Cada tipus de màquina té avantatges i aplicacions específiques, i l'elecció del tipus de màquina a utilitzar dependrà dels requisits del procés de trefilatge i del material que s'estigui processant.

1.2.6 PASSOS PREVIS AL PROCÉS DE TREFILAT

Per tal de desenvolupar el procés de trefilat cal seguir una sèrie de passos. Primer de tot cal preparar l'estat superficial del material a trefilar, ja que això té una relació directa amb la vida útil de de la filera. A continuació, es procedeix a enfilat la màquina, per a fer-ho hi ha diverses maneres. Es segueix per la subjecció de del material i a partir d'aquest pas comença el procés de trefilatge. Aquests són els passos bàsics a seguir, en funció de les necessitats del procés es poden afegir passos com per exemple: l'escalfament del material, la lubricació de la filera, etc. (Porta, 2010)

1.2.6.1 PREPARACIÓ DE SUPERFÍCIE

El primer pas consisteix en preparar la superfície del filferro. Aquest pas és essencial ja que permet l'eliminació d'agents contaminants del producte final com poden ser òxids o excessos de recobriment. Un cop net és possible l'aplicació d'algun tipus de lubricant.

Aquesta neteja ajuda a evitar danys a la superfície així com també protegeix els utilitatges.

Per realitzar aquesta neteja existeixen dos mètodes diferents: el decapat químic o el decapat mecànic. Aquests s'expliquen a continuació.

El decapat químic consisteix en aplicar una solució d'àcid sulfúric que ajudi a eliminar els òxids de la superfície del material. Seguidament, cal banyar el material en òxid de calç o sals inhibidores, les quals aturen la reacció d'atac del àcid.

El decapat mecànic consisteix en utilitzar un equip auxiliar, com el de la Figura 13, que es compon de dos rodets peladors els quals retiren qualsevol impuresa de la superfície del filferro. (Córdoba, 2011)



Figura 13. Màquina emprada per a realitzar decapats mecànics

(Font: <https://www.expometals.net/es/hall/equipo/portahileras/stand/omf-officina-meccanica-frigerio-srl/products/maquinas-para-decapado-mecanico-de-alambre>)

1.2.6.2 ENFILAR LA MÀQUINA(PORTA, 2010)

El segon pas consisteix en enfilar la màquina, és a dir, a fer passar per primer cop el filferro inicial per la filera per tal de poder subjectar-lo des de l'altra banda. Com que inicialment aquest té un diàmetre superior i no hi cap, cal rebaixar el diàmetre per tal de poder enfilar la màquina. Trobem els següents mètodes:

1. Soldadura

Consisteix en soldar, mitjançant una soldadura resistiva, a l'extrem del filferro inicial un altre filferro de menor diàmetre. Aquest ha de tenir un diàmetre menor i suficient com per que passi pel forat de la filera. La longitud d'aquest filferro auxiliar cal que sigui suficientment llarga com per arribar al tambor de sortida. Cal també que aquest pugui

Disseny i validació d'un equip de trefilat en calent de fil d'alumini per a impressió 3D
Enric Guisado Corcoll

suportar la tensió de trefilat. Per a fer això, es disposa de màquines dissenyades per a aquesta finalitat, com la de la Figura 14.



Figura 14. Màquina emprada per soldar dos extrems de fil metàl·lic

(Font: <https://es.aliexpress.com/item/1005002731411486.html>)

2. Laminació

Consisteix en laminar l'extrem del filferro de la bobina inicial fins a aconseguir un diàmetre suficientment petit com per què aquest passi pel forat de la filera. A continuació, en la Figura 15 es mostra una imatge d'una màquina que realitza aquesta tasca.



Figura 15. Màquina laminadors d'extrems de fil

(Font: <https://www.amazon.com/-/es/HYYKJ-US-Molinillo-laminaci%C3%B3n-bricolaje-engranajes/dp/B0841GL834>)

3. Empenta posterior

Consisteix en fer passar el rodó a través de la filera mitjançant una força que comprimeix l'extrem contra una sèrie de forats de menor diàmetre. Aquest mètode només és aplicable a barres d'un diàmetre certament gran, ja que s'està aplicant un procés d'extrusió i per a això es requereix una superfície on aplicar una força.

4. Mecanització

Consisteix en mecanitzar l'extrem del filferro per tal que aquest disposi d'un diàmetre apte per a travessar la filera.

5. Forja

Consisteix en reduir el diàmetre del filferro a base de cops i calor.

1.2.7 MATERIALS PER AL TREFILAT

Els materials utilitzats per a el trefilatge son de naturalesa metàl·lica i els més utilitzats en la indústria són: acers al carboni i aliats, coure i els seus aliatges, llautons, alumini i els seus aliatges i magnesi i els seus aliatges. (Cuascota, 2021)

1.2.7.1 PROPIETATS MECÀNIQUES DELS MATERIALS (RODRÍGUEZ, 2017)

1.2.7.1.1 RESISTÈNCIA A TRACCIÓ

La resistència a tracció o tensió de ruptura queda definida pel quocient entre la càrrega de tracció màxima que suporta una proveta d'un material en l'instant en què es produeix el trencament i la superfície transversal d'aquesta.

El procés de trefilat té lloc com a conseqüència de l'acció directa de l'esforç de tracció que té lloc en l'extrem de la barra i és per això que els materials susceptibles de ser trefilats requereixen una bona resistència a tracció.

A causa de la deformació plàstica que pateix el material durant el procés, aquesta propietat es veurà alterada en funció del grau de deformació aplicat al material. En general, en la majoria de metalls utilitzats per al procés de trefilatge, la resistència a la tracció es veurà incrementada com a conseqüència de la deformació plàstica i de l'aparició d'acritud.

Es convenient que la força d'estirat aplicada a la sortida de la filera no assoleixi el valor de la resistència a tracció, ja que en cas contrari el material es podria trencar a la sortida de la filera i faria inviable el procés.

1.2.7.1.2 LÍMIT ELÀSTIC O DE FLUÈNCIA

El límit elàstic d'un material es defineix com el valor de la càrrega de tracció aplicada a partir de la qual es comença a produir una deformació permanent. La fluència d'un

material sotmès a un esforç de tracció consisteix en l'allargament plàstic que pateix, fet que implica una deformació permanent.

Com a conseqüència de la deformació plàstica, una vegada sotmès al procés, el límit de fluència del material obtingut es veurà alterat significativament.

En el procés de trefilatge en fred es convenient que el material posseeixi un límit de fluència relativament baix, ja que si aquest fos elevat es requeriria més esforç per assolir el límit plàstic. En aquest cas, el valor de la tensió de trefilatge necessària podria elevar-se fins al punt en què podria provocar el trencament de la filera.

Un material que hagi patit un procés d'estirat, incrementarà el seu límit de fluència. Aquesta característica dels metalls és fonamental en el procés, ja que convé que el material obtingut a la sortida de la filera tingui un límit de fluència mínim que permeti suportar la tensió de tracció aplicada a l'extrem, evitant deformacions no desitjades en el producte.

El material trefilat ha de mantenir un comportament certament elàstic durant el procés, això permetrà obtenir una secció uniforme, sense irregularitats i homogènia en tota la longitud del producte.

La força aplicada a l'extrem de la barra o filferro per aconseguir fer-lo passar per l'eina de deformació, mai podrà assolir el valor màxim de la tensió de fluència ja que per el contrari el producte no mantindrà la secció desitjada en tota la seva longitud i no posseirà la qualitat òptima.

1.2.7.1.3 DURESA

És la propietat dels materials a oposar-se a ser penetrats o ratllats.

Els processos de conformat per deformació plàstica que impliquen la compressió del material, com ara la forja, produeixen un augment de la duresa del material obtingut. A diferència de la forja, el trefilatge es produeix mitjançant l'aplicació d'un esforç de tracció. Tot i això, el material és sotmès a compressió durant el seu pas per la filera, fet que suposa un increment de la duresa. En aquest procés, l'increment de duresa en el material és directament proporcional al grau de deformació aplicat.

A més, tot i que l'objectiu principal del procés és aconseguir una modificació de la

geometria, també es busca assolir unes propietats mecàniques concretes. Entre elles, el grau de duresa superficial n'és una.

Per aconseguir incrementar el valor de la duresa superficial cal aplicar reduccions de secció petites en les últimes etapes del procés. Aquesta tècnica permet conservar les propietats mecàniques a les zones més pròximes al nucli i aconseguir una duresa més elevada en aquelles zones més superficials.

1.2.7.1.4 DUCTILITAT

La ductilitat és la capacitat d'un material per deformat-se plàsticament sense arribar al trencament. Com és evident, és una qualitat necessària en un material que es sotmetrà a un procés de conformat per deformació plàstica.

El procés de trefilatge afecta significativament a la ductilitat del material ja que, un cop treballat, aquesta propietat es veurà minvada de manera proporcional al grau de deformació.

El processos de trefilatge sovint són multi-etapa, és a dir, que per assolir el producte final s'ha de repetir el procés diverses vegades. Un procés d'aquestes característiques ha de estar dissenyat de forma adient per tal que no es produeixin deformacions indesitjades o trencaments inesperats i, per tant, es pugui avançar un major nombre d'etapes. Si el procés ha estat correctament dissenyat, no existeix la necessitat de practicar recuites entre etapa i etapa.

1.2.7.1.5 ENDURIMENT PER DEFORMACIÓ EN FRED O ACRITUD

L'acritud és un fenomen que té lloc en els materials que es deformen plàsticament. Implica un augment de la duresa i el seu límit de fluència com a conseqüència de les deformacions plàstiques permanents. (Callister, 2020).

Aquest enduriment, en ocasions, s'aplica de forma controlada amb la finalitat de millorar les propietats mecàniques dels productes. Tot i això, els efectes produïts per l'aparició d'acritud es poden reduir o eliminar aplicant tractaments tèrmics o realitzant el procés sota condicions de temperatura, temps i condicions de refredament controlades. Fets que permetran la reestructuració cristal·lina del metall.

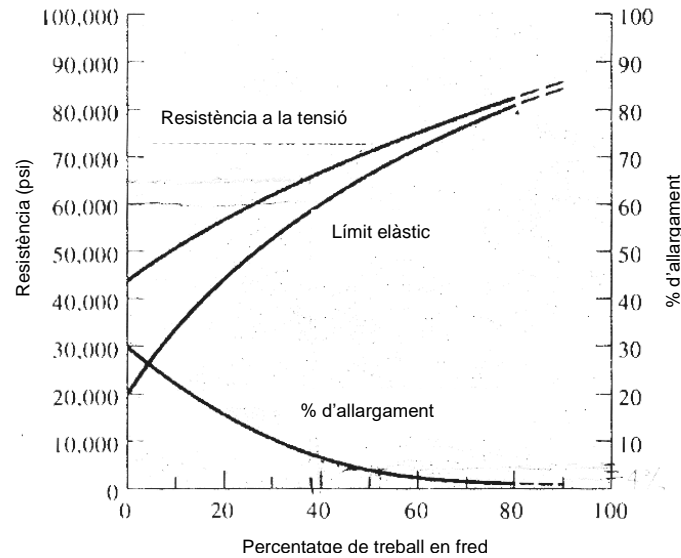


Figura 16. Gràfic comparatiu del límit elàstic, la resistència a tracció i l'elongació en funció del percentatge de treball en fred

(Font: (Askeland, 2017))

En la Figura 16 es pot observar com evolucionen la resistència a tracció, el límit elàstic i el % d'elongació en funció del percentatge de deformació. En els dos primers casos veiem com augmenten a mesura que augmenta el tant per cent de deformació en fred i, per tant, el material s'està enrigidint. Per contra, a mesura que augmenta la deformació, el % d'elongació disminueix.

En definitiva, l'estirat multi-etapa produeix canvis significatius en la microestructura del material cosa que comporta una variació de les seves propietats mecàniques. Aquests canvis suposen un allargament del gra en el cas del trefilatge. La tenacitat i la ductilitat del material, després de ser processat, es veuen reduïdes mentres que el seu límit de fluència, el límit de ruptura i la seva duresa es veuen afectades a mesura que incrementa el grau de deformació plàstica i, per tant, s'avança en les diferents etapes del procés.

1.2.7.2 TRACTAMENTS TÈRMICS(RODRÍGUEZ, 2017)

Un tractament tèrmic és un procés en el qual s'escalfa un metall a una temperatura determinada i en unes condicions determinades per a posteriorment refredar-lo en unes condicions determinades amb la finalitat de modificar la seva microestructura. Aquestes operacions es solen fer sota condicions d'entorn i velocitat controlades. Modificant la microestructura dels metalls es poden variar les seves propietats mecàniques, com per exemple: la resistència a tracció, la tenacitat, la duresa o la ductilitat.

Les propietats mecàniques d'un metall de la seva composició química i la seva estructura cristal·lina. Tot i l'existència dels tractaments termo-químics, que permeten alterar la composició química d'un material, els tractaments tèrmics alteren l'estructura cristal·lina sense alterar la composició i amb la finalitat d'assolir unes propietats mecàniques determinades.

En el procés de trefilatge, tal i com s'ha vist anteriorment, pot existir la necessitat de tractat tèrmicament un producte entre dues etapes per tal de poder continuar el procés sense que es produeixin defectes o trencaments de material. Això sol passar en els processos en que hi ha múltiples etapes. Tot i això, el més habitual en la indústria és l'aplicació de tractaments tèrmics al final del procés. Un cop el producte ha estat trefilat, se l'hi apliquen certs tractaments per tal de donar-los-hi certes qualitats desitjades.

Els paràmetres de tractament tèrmic poden ser molt variats donada la gran varietat de materials que es poden sotmetre al procés de trefilatge. No obstant, a continuació es realitza una breu descripció dels tractaments més usuals en procés de trefilatge.

1.2.7.2.1 RECUITA

La recuita consisteix en agafar el metall que es desitja tractar i escalfar-lo fins que aquest arribi a la seva temperatura de recristal·lització. Seguidament, es refreda fins que arriba a temperatura ambient. Tant les velocitats d'escalfament i refredament com l'atmosfera on es practica el tractament es controlen en funció de les necessitats del material i les característiques que se l'hi vulguin atorgar.

Aquest tractament tèrmic té com a finalitat principal recuperar l'estructura inicial del metall, eliminant les tensions internes. A més, el metall recupera la seva ductilitat i es restableixen les seves propietats mecàniques inicials. La temperatura de recristal·lització d'un metall és aquella a la qual es comencen a formar nous grans estructurals i lliures de tensions. Les dislocacions desapareixen en la estructura cristal·lina i, per conseqüència, el metall recupera la seva ductilitat.

L'objectiu principal d'aquest tractament és permetre continuar amb el conformat per deformació plàstica quan el metall ha assolit el seu grau màxim d'enduriment per deformació, o altrament dit, quan la seva duresa és màxima i posseeix molta acritud. Al aplicar aquest tractament, s'aconsegueix una bona estabilitat dimensional en totes les etapes del procés i s'eliminen les tensions internes produïdes pel mateix. Es pot aplicar abans de començar el procés, entre etapes o inclús al final, en el propi producte trefilat.

Segons el tipus d'aliatge i les propietats que es desitgin aconseguir, existeixen diversos cicles tèrmics per als diferents objectius de la recuita. Aquestes variants de tractament varien en els àmbits de temperatura a la que s'escalfa el material i mètode de refredament utilitzat. Aquest últim, condicionarà per complet la velocitat de refredament a causa de la naturalesa del medi.

En el procés de trefilatge seqüencial, la microestructura del fil o filferro evoluciona de forma que es produeix un increment progressiu de les tensions internes del metall. Conseqüentment, això suposa una pèrdua de ductilitat. Això implica l'increment del grau d'enduriment per deformació plàstica i, com a conseqüència, es pot produir el trencament del filferro en qualsevol moment del procés. Així doncs, la recuita entre etapes pot ser imprescindible.

Aquest tractament es sol aplicar a bobines de producte acabat. Aquestes bobines s'introdueixen en grans forns a causa del seu volum, tal i com es pot observar en la Figura 17, i es refreden en els seus medis adequats.



Figura 17. Bobines de fil essent tractades tèrmicament

(Font: <https://www.youtube.com/watch?v=le-aB2hMjc8>)

1.2.8 PARÀMETRES INFLUENTS EN EL PROCÉS DE TREFILAT (RODRÍGUEZ, 2017)

Per poder controlar el procés de trefilatge i minimitzar el desgast de la filera és indispensable conèixer la influència de tots els factors implicats, els quals afectaran tant en el producte final com en les eines utilitzades.

En el procés de trefilat hi ha certs paràmetres que es poden modificar per tal d'obtenir un resultat o un altre. Alguns paràmetres poden estar implícits en les eines, però, a continuació, es discutiran aquells paràmetres que es poden modificar i que tenen una influència directa en el producte final.

Una de les conseqüències de l'existència de fregament entre el fil i la filera, és l'aparició d'un treball addicional que afecta directament al valor de la tensió mínima necessària per a realitzar el procés. (Kalpakjian, 2008) A major fregament, major serà el valor de la tensió requerida per deformar el metall. Per aquest motiu, és primordial reduir al màxim aquest fregament .

Tot i que l'increment de la tensió de tracció no és un inconvenient fonamental, un excés de fregament podria deteriorar greument la superfície de la filera reduint la seva vida útil. El material del que està fabricada la filera així com el propi material a deformar, són factors determinants del coeficient de fregament que existirà entre les dues parts.

Un altre aspecte relacionat amb el fregament és l'acabat superficial de l'eina i la matèria prima. Un bon acabat superficial de ambdues parts suposarà un menor fregament en el procés i viceversa.

La deformació del material succeeix com a conseqüència de la pressió exercida per la superfície de la filera contra el material a trefilar. Aquest contacte comporta un fregament. És per això, que cal conèixer aquest valor i aplicar mètodes per poder controlar-lo.

La lubricació és una de les possibles solucions a el fregament existent entre material i eina. No obstant, cal conèixer el material del qual estan compostos tant la matèria prima com l'eina de treball per poder determinar la lubricació més òptima. També cal conèixer la qualitat superficial d'ambdues parts, la reactivitat química entre elles, la temperatura, la pressió existent en la zona de contacte eina-peça i la velocitat de trefilatge.

La principal funció d'un lubricant és reduir i mantenir estable un valor de fregament òptim durant el procés de conformat per deformació plàstica. Així doncs, s'optimitzarà la durabilitat de la filera, la qualitat del producte i, com a conseqüència, la productivitat del procés.

Fóra bo comentar que la lubricació també pot actuar com a agent refrigerant i permet mantenir neta la superfície de treball de la filera així com també la del producte acabat.

1.2.8.1 FREGAMENT

Tal i com s'ha explicat anteriorment, el fregament és un dels paràmetres que apareix a causa de la naturalesa del procés. Aquest factor té una implicació directa en la tensió de tracció per a la deformació del material. Tot i l'increment de la tensió, les tensions generades en la zona superficial del producte a causa del fregament, tenen una gran influència en la fluència del metall ja que poden provocar heterogeneïtats, esquerdes superficials o altres tipus de defectes.

La conseqüència més greu de un excessiu coeficient de fregament seria l'adherència del metall a la superfície de la filera. (Kalpakjian, 2008) Aquest fenomen pot limitar l'interval de reducció de secció que serà possible en un procés de múltiples etapes.

El fenomen d'adherència té lloc més fàcilment en uns metalls que en altres i pot produir-se de dues formes diferents. La primera té una relació directa amb la rugositat de la superfície de l'eina, que en absència de lubricant, provoca un desprendiment de partícules superficials del filferro i, per tant, provoca imperfeccions i defectes superficials en el producte acabat. La segona, que esdevé més greu encara, es produeix quan la superfície del fil metàl·lic perd la capa protectora per l'acció exfoliant de petites partícules d'òxid. En aquest cas el metall queda desprotegit i per l'acció de la pressió tendeix a soldar-se a l'eina. Aquest fet pot provocar que una secció del fil es desgasti fins a tal punt que sigui impossible realitzar el procés. (Rodríguez, 2017)

És per tot això que cal controlar el fregament entre l'eina i el material a trefilar per tal d'afavorir la productivitat i obtenir un producte amb les qualitats òptimes.

1.2.8.2 LUBRICACIÓ

La lubricació és un paràmetre clau en el procés de trefilatge. Esdevé determinant en la productivitat del procés, en la qualitat del producte i en la duració de les eines. Aquest paràmetre té molta relació amb el fregament i és el principal actor en el seu augment o disminució. (Schey, 2002)

Existeixen diferents mètodes i tipus de lubricació. L'elecció d'aquests s'ha de fer en funció de la naturalesa i geometria de la matèria prima, la reducció que es planteja fer i les especificacions tant del client com del producte en si.

Un cop el sistema de lubricació ha quedat definit, és essencial assolir un rendiment constant per assegurar que les condicions es mantenen en tot el procés. Una lubricació òptima i un control continu durant tot el procés assoleixen valors de tensió de tracció menors.

Els sabons, greixos, pols de grafit o olis emulsionats amb aigua són els agents lubricants més habituals en processos de trefilatge d'acers. S'empren aquests líquids a causa de la necessitat del procés d'un major poder de refrigeració. El olis vegetals, greixos animals i emulsions d'alta concentració s'usen pel trefilatge de metalls no fèrrics com el coure, l'alumini i els seus aliatges. A més, existeixen lubricants a base de greixos que, al reaccionar amb les superfícies metàl·liques, creen una pàtina sabonosa.

A més dels típics lubricants, sòlids com el tefló o el polietilè també s'usen. Aquest tipus de materials, de naturalesa polimèrica, juntament amb altres com el grafit o el disulfur de molibdè, tenen la capacitat de crear una pel·lícula sòlida que actua com a lubricant entre les superfícies de contacte.

L'elecció del mètode de lubricació i el lubricant més apropiat per a cada procés, és fonamental per assolir una deformació òptima. Els tipus de lubricants més comuns es presenten a la Taula 2.

Taula 2. Taula comparativa dels coeficients de fricció en funció dels lubricants usats (Schey, 2002)

Material a trefilar	Lubricant	μ
Acers	Sabó i fosfats	0,03
Acers Inoxidables	Sabó i fosfats o parafina clorada o olis minerals	0,05
Aliatges d'Alumini	Àcids i alcohols greixosos o olis minerals	0,03
Aliatges de Cu	Olis minerals	0,03
Aliatges de Sn, Pb, Zn	Olis greixosos (Oli de palma o Oli sintètic)	0,05
Aliatges de Ti	Polímers	0,1

1.2.8.3 TEMPERATURA

En el trefilatge en fred, en el qual el procés té lloc a temperatura ambient, es genera calor com a conseqüència del treball aplicat i de la fricció. La distribució de temperatura, tant en la filera com en el fil metàl·lic, afectarà al grau d'expansió tèrmica, al patró de deformació i a la recuperació elàstica del material. Aquest paràmetre té conseqüències directes en les característiques i propietats del producte final conformat. (Haddi, 2011)

El treball originat per la tensió de tracció aplicada genera un increment de la temperatura en la zona on es produeix la deformació. L'efectivitat del sistema de lubricació també dependrà en gran mesura de la temperatura assolida pel sistema. Per tant, es pot afirmar que la temperatura en la zona de deformació dependrà directament del coeficient de fregament entre els materials. (El-Domiaty, 1998)

La distribució de temperatures en el procés de trefilatge condiciona els efectes de la fricció, en funció de la temperatura inicial del metall i la filera, l'increment de temperatura produït per la deformació i la conductivitat tèrmica tant del material a processar com de l'eina. (El-Domiaty, 1998)

L'ús d'un sistema de lubricació eficient significarà una reducció considerable de l'augment de la temperatura tant dels utilatges com dels elements a processar. Conseqüentment, aquest fet comportarà un estalvi energètic. L'eficiència energètica és un factor important en qualsevol procés de conformat per deformació plàstica, sobretot a l'hora de decidir si el procés es viable o no econòmicament, tenint en compte la competitivitat del mercat.

La temperatura és un paràmetre determinant a l'hora de dissenyar un procés de trefilatge, ja que la tensió mínima de tracció a aplicar a l'extrem del fil dependrà de la temperatura existent en la zona de deformació.

En un procés de trefilatge de múltiples etapes, quan el sistema de lubricació és eficient i s'utilitzen velocitats en un rang adequat, la temperatura del metall en la zona de deformació s'estabilitza al cap d'un temps determinat. És per això, que el procés esdevé isotèrmic sempre i quan no es produeixin canvis en l'entorn de treball.

En resum, és important controlar la temperatura tant del material com dels utilitatges per prevenir problemes i mantenir la vida útil de les eines.

1.2.8.4 VELOCITAT

La velocitat d'avançament del material a través de la filera és un paràmetre que defineix la velocitat del procés de trefilatge d'un fil metàl·lic. Es tracta d'un paràmetre que té influència en l'eficiència general del procés i en el desgast dels recursos fungibles, com són les eines.

En funció de la velocitat del procés, pot existir un determinat increment de la temperatura en la zona de deformació. Aquest increment pot comportar una alteració de les condicions de fregament. Existeix un rang de velocitats en el que l'increment de temperatura, causat pel fregament, es manté sota mínims i esdevé controlable mitjançant un sistema de lubricació adequat. (Tschaetsch, 2005)

Per maximitzar la productivitat en el procés cal augmentar la velocitat del mateix, sempre i quan aquest fet no comporti trencaments o empitjoraments de la qualitat del producte, ja que llavors seria contraproductiu.

Cal destacar que en un procés de trefilatge de diverses etapes, a causa de la naturalesa del procés, la velocitat incrementa en cada una de les etapes a mesura que el diàmetre del producte disminueix. En la Taula 3 es mostren les velocitats més habituals que s'apliquen en els processos de trefilatge.

Taula 3. Taula comparativa entre les resistències a tracció dels diferents materials i les velocitats de treball (Tschaetsch, 2006)

Material	Resistència a Tracció R_m (MPa)	Velocitat (m/s)
Acer	400	20
	800	15
	1300	10
Coure (Recuïta)	250	25
Llautó, Bronze	400	
Alumini (Recuïta) i aliatges	80 - 100	

Un augment de la velocitat del procés produeix un increment en l'enduriment per deformació plàstica. Per tant, la resistència a tracció del producte augmenta notòriament. Tot i això, les velocitats altes impliquen una millora de l'acabat superficial. L'ús de velocitats elevades és molt habitual en el procés de trefilatge ja que així s'obté un augment de la productivitat.

En resum, en cadascuna de les etapes del procés de trefilatge és necessari aconseguir, controlar i conèixer tots els paràmetres citats anteriorment ja que, tal i com es pot veure en la Figura 18, entre ells modifiquen la tensió de tracció i, en conseqüència el producte final.

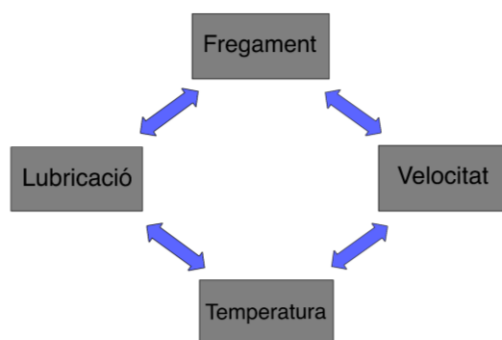


Figura 18. Relacions entre els diferents paràmetres que intervenen en el trefilat

(Font: Elaboració pròpia)

1.2.9 TEMPERATURA DE TREBALL

En els processos de deformació plàstica sovint es treballa en fred. Això suposa deformar el material quan aquest es troba a temperatura ambient (25°C). Tot i això, existeix la possibilitat de treballar en tebi o en calent.

Treballar a major temperatura implica una reducció, gairebé exponencial, de les tensions necessàries per a deformar els materials. L'increment de la temperatura estova els materials i, per tant, una reducció de múltiples propietats mecàniques. (Kapustová, 2012) En la Figura 19 es pot observar com al augmentar la temperatura disminueix la resistència a tracció.

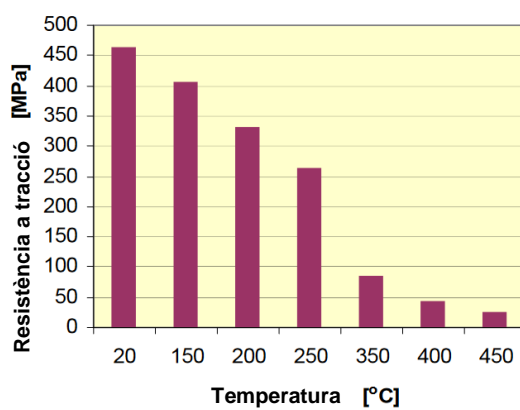


Figura 19. Evolució resistència a tracció en funció de la temperatura de l'aliatge AICu4Mg1

(Font: (Kapustová, 2012))

És per aquest motiu que molts processos de deformació plàstica es plantegen implementar el treball en tebi o en calent per tal de reduir les forces necessàries per a deformar els materials i així aconseguir diferents beneficis, com per exemple: canvis en la microestructura dels materials, reducció dels costos energètics, etc.

Treballar en tebi implica treballar entre un 30% i un 50% de la temperatura de fusió del material. D'altra banda treballar en calent significa deformar el material per sota del 70% de la temperatura de fusió.

Aliatges destinats a la deformació plàstica, com per exemple l'alumini 7050, quan es treballen en calent requereixen de menys esforç per a poder-los deformar. (Yang, 2013) Aquesta informació la corrobora un estudi dut a terme on es van assajar mostres d'aquest aliatge a diferents temperatures. En concret, temperatures que anaven des dels 320°C fins als 440°C. Aquestes es troben per sota del 70% de la temperatura de fusió d'aquest aliatge (635°C).

1.2.10 MECÀNICA DEL TREFILATGE (KALPAKJIAN, 2008)

Per a deformar un material de secció circular mitjançant el procés de trefilatge cal aplicar una força de tracció a l'extrem d'aquest. Aquest esforç ha de ser capaç de fer passar el material primari a través de l'eina per a poder aconseguir la deformació necessària.

Per a realitzar aquest esforç de tracció cal tenir en compte els següents factors: el treball sorgit de la deformació, el treball originat pel fregament i el treball redundat ocasionat per la deformació interna del material. Tenint en compte tots aquests factors es podrà calcular la tensió mínima necessària per a deformar el fil.

1. Deformació Ideal

El treball de deformació és aquell que s'encarrega de proporcionar l'esforç suficient per a poder assolir la reducció de diàmetre i , per tant, la variació de la secció. En altres paraules, és aquell imprescindible per a la conformació del producte. Per a poder calcular aquest esforç cal tenir en compte la reducció de secció i la geometria de la filera. El paràmetre que influeix en aquest treball i que és intrínsec a la filera és l'angle d'atac que presenta aquesta i que es pot observar en la Figura 6.

2. Fregament

El fregament també forma part de l'esforç necessari a fer per a trefilar el material i acaba suposant un augment de la tensió final. Aquesta variable és intrínseca al procés i pot variar en funció de les necessitats. Aquest treball succeeix a causa de les forces de fregament de la peça amb la filera provocades per la força normal p que apareix en la intercara fil-filera (Figura 21).

Aquest treball generat pel fregament pot variar exponencialment en funció del coeficient de fregament existent entre els dos principals elements implicats. Aquest coeficient pot variar en funció de si es fa servir o no lubricants.

3. Treball redundat

Finalment, el treball redundat és aquell que sorgeix a causa de les tensions tallants internes que apareixen al deformar el material tal i com s'observa en la Figura 20.

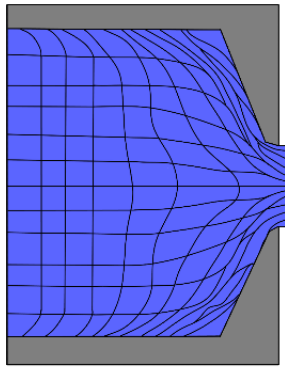


Figura 20. Representació esquemàtica de la deformació interna que pateix un fil al ser trefilat

(Font: Elaboració Pròpia)

La suma dels tres factors ens dona una aproximació de l'esforç necessari per a dur a terme el trefilatge. (Eq. 2)

$$\sigma_t = \bar{Y} \left\{ \overbrace{\left(1 + \frac{\tan \alpha}{\mu}\right)}^{\text{Treball ideal}} \left[\overbrace{1 - \left(\frac{A_i}{A_0}\right)^\mu \cot \alpha}^{\text{Treball de fricció}} \right] + \overbrace{\frac{4}{3\sqrt{3}} \alpha^2 \left(\frac{1-r}{r}\right)}^{\text{Treball redundant}} \right\} \quad \text{Eq. 2}$$

On r representa la reducció fraccional de l'àrea. (Eq. 3)

$$r = \frac{A_i}{A_0} \quad \text{Eq. 3}$$

1.2.10.1 OBTENCIÓ TENCIÓ DE FLUÈNCIA MITJANA

Fora bo comentar que per a calcular l'esforç per a deformar la peça cal tenir en compte que s'està actuant sobre materials amb un comportament de enduriment per deformació i per això cal introduir el paràmetre de la tensió de fluència mitja. Aquest representa la tensió existent en la secció d'una proveta normalitzada, la qual es troba sotmesa a tracció o compressió en l'instant en que s'inicia la fluència o deformació plàstica del mateix. (Callister, 2020) La introducció d'aquest paràmetre reflecteix el comportament d'enduriment per deformació dels materials ja que la tensió de fluència augmenta a mesura que augmenta el percentatge de deformació del material.

L'obtenció d'aquesta tensió es pot fer a partir de la Eq. 4, la Eq. 5 i la Eq. 6. (Rodríguez, 2017). Per a obtenir la Eq. 4 cal realitzar l'anàlisi local de tensions en el trefilat d'un fil metàl·lic de secció circular. A partir d'aquest es pot obtenir la següent expressió. Al aplicar un esforç de tracció en un fil que travessa una filera apareixen els següents esforços (Figura 21), on D és el diàmetre del diferencial, D_0 és el diàmetre inicial, D_f és

el diàmetre final, σ_x és la tensió aplicada en la direcció longitudinal del fil, p és la força normal perpendicular que apareix entre el fil i la paret de la filera, μ és el coeficient de fregament, α és l'angle d'atac de la filera.

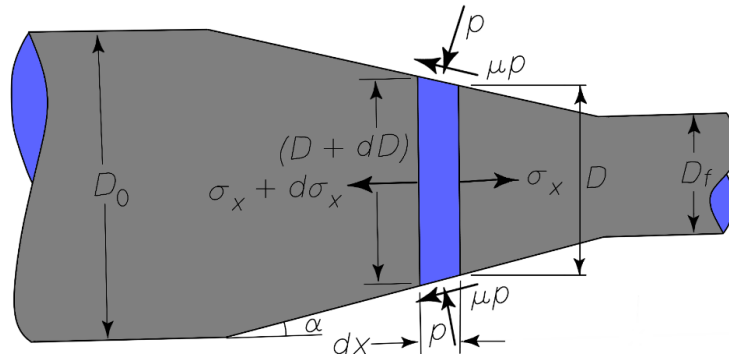


Figura 21. Esquema del anàlisi local de tensions en el trefilatge.

(Font: Elaboració Pròpia)

$$\frac{\sigma_x}{Y} = \frac{(1+B)}{B} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2B} \right] \text{ on } B = \mu / \tan \alpha \quad \text{Eq. 4}$$

$$Y_0 = Y - K \cdot \varepsilon^n \quad \text{Eq. 5}$$

$$\bar{Y} = Y_0 + \frac{K \cdot \varepsilon^n}{1+n} \quad \text{Eq. 6}$$

Per a calcular la tensió de fluència cal aïllar la tensió de fluència Y de la Eq. 4 i imposar que $\sigma_x = R_m$. Seguidament cal substituir el valor de Y en la Eq. 5 i obtenir Y_0 . Finalment, cal repetir el mateix procediment però en la Eq. 6 substituint la Y_0 per a finalment obtenir la tensió de fluència mitjana \bar{Y} .

1.3 TECNOLOGIES DE FABRICACIÓ ADDITIVA

S'entén per tecnologies de fabricació additiva tots aquells processos de manufactura que són capaços de crear un objecte tridimensional gràcies a la superposició de capes successives de material. (Leal, 2015) Col·loquialment la majoria de tècniques de fabricació additiva es coneixen com impressió 3D.

1.3.1 IMPRESSIÓ 3D (GIBSON, 2021)

Existeix una gran varietat de tecnologies d'impressió 3D en el mercat. Totes i cadascuna d'elles amb diferents beneficis i limitacions. Les principals diferències entre elles resideixen en els materials utilitzats per a manufacturar els objectes i el procés utilitzat per a materialitzar cada capa de material.

Algunes tècniques es basen en la transformació del material davant d'un canvi tèrmic, com per exemple, el modelat per deposició fosa (FDM – Fused Deposition Modelling) i el sinteritzat de làser selectiu (SLS). D'altres, es basen en la fotopolimerització per rajos ultra violeta de polímers termoestables, com per exemple, les tècniques de estereolitografia (SLA - Stereolithography).

Tot i que la majoria de materials són susceptibles a ser usats per a la fabricació additiva, els polímers són els únics que s'empren en tècniques de fotopolimerització. Les altres famílies de materials, com els metalls o les ceràmiques, usualment s'empren en tècniques de modelat per deposició.

A causa de l'interès d'aquest treball en desenvolupar filament d'alumini per a impressió 3D, a continuació s'exposaran les tècniques emprades per als metalls.

1.3.2 TÈCNIQUES DE IMPRESSIÓ 3D DE METALLS (ABOULKHAIR, 2019)

En l'actualitat, la fabricació per impressió 3D de peces de metall es basa en processos de fabricació additiva. Dins la fabricació additiva, es poden trobar tres tipus:

1. Power Bed Fusion (PBD)

Dins aquest tipus, els sistemes més utilitzats en la indústria són el SLM (Selective Laser Melting) i el EBM (Electronic Beam Melting). Ambdós sistemes, usats per a la fabricació de peces amb geometries complexes, es basen en la col·locació d'una fina capa de pols metàl·lica sobre un pla on es realitzarà la posterior fusió de les zones interessades. Tot i que, els dos fonen partícules de pols, aquests ho fan de formes diferents. El SLM fa ús d'un làser, mentre que el EBM fa ús d'un feix d'electrons per a la fusió de la pols.

Un cop s'ha finalitzat la fusió de les partícules desitjades, es repeteix el procés. S'aplica

una nova capa de pols i es prossegueix amb la fusió de més partícules. A continuació es pot veure una representació gràfica del procediment (Figura 22).

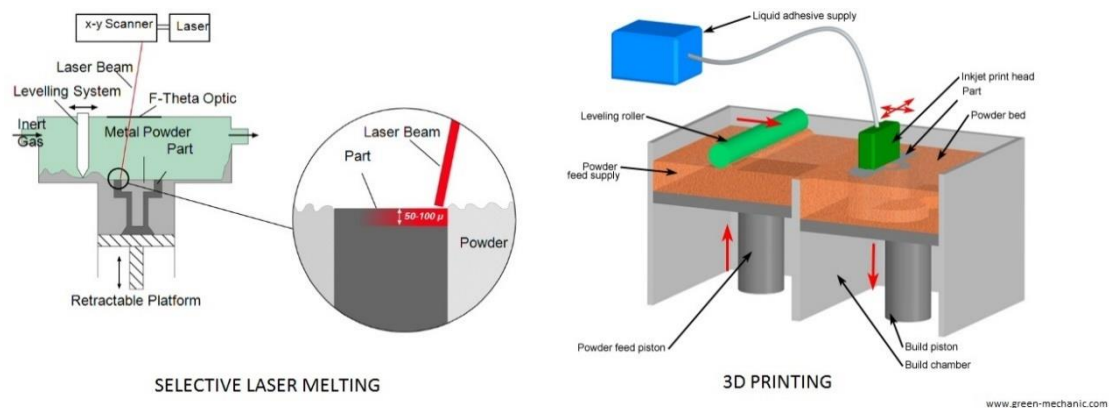


Figura 22. Representació gràfica del sistema SLM

(Font: <https://www.green-mechanic.com/2016/12/comparison-between-3d-printing-3dp.html>)

2. Directed Energy Deposition (DED)

Aquest tipus de fabricació additiva es basa en fer ús d'una font de calor per a fondre, generalment, filament metàl·lic al mateix temps que es va dipositant sobre una superfície. Aquesta no té perquè ser una superfície plana, ja que aquesta tecnologia està pensada per a afegir material a peces ja existents. És a dir, és capaç d'arreglar superfícies de peces que hagin estat malmeses. Cal destacar aquesta simultaneïtat ja que ambdós passos es realitzen al mateix temps, tal i com es pot veure en la Figura 23.

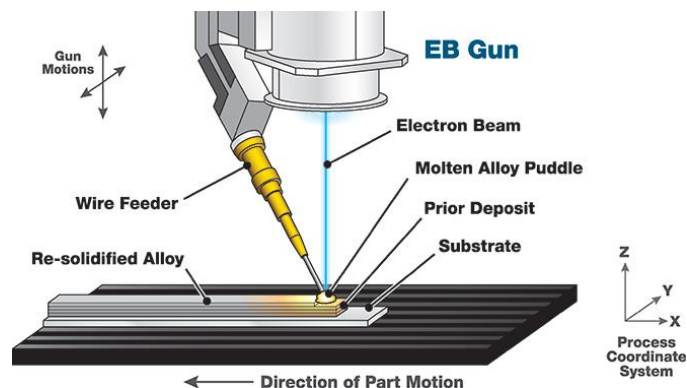


Figura 23. Representació gràfica del procés DED

(Font: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/what-is-ded-3d-printing>)

3. Drop on Demand (DoD)

Per últim, el tipus de fabricació DoD consisteix en la deposició de gotes de material sobre una superfície a través d'un impuls d'elevada pressió. Aquestes gotes provenen d'un contenidor auxiliar on el material es troba en estat líquid.

1.3.3 IMPRESSIÓ 3D PER FDM (FUSED DEPOSITION MODELLING)

La impressió 3D per FDM és un mètode de fabricació additiva que es basa en la creació de peces capa per capa. Cada capa és creada per un filament que prèviament s'escalfa i, seguidament, és extrusionat per una boquilla, generalment cilíndrica. En la Figura 24 es pot veure una descripció gràfica del mètode. Des dels seus inicis, s'ha utilitzat amb filaments termoplàstics a causa del seu baix punt de fusió. (Fafenrot, 2017).

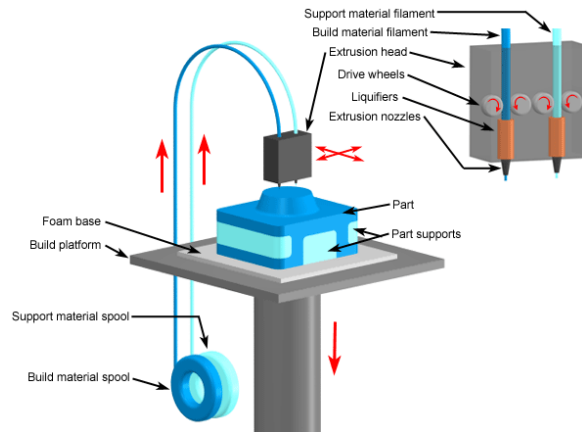


Figura 24. Representació gràfica mètode FDM

(Font: <https://www.worldmaterialsforum.com/files/Presentations/WS1-1/WMF%202016%20-%20WS%201.1%20-%20Sung%20Ha%20Final.pdf>)

Tot i que la gran majoria d'impressores de tipus FDM treballen amb filaments termoplàstics, en l'actualitat és un camp d'estudi l'aplicació de filaments metàl·lics en aquest mètode de fabricació additiva.

A dia d'avui, s'ha assolit la impressió 3D amb filaments híbrids. Per filament híbrid, s'entén un filament compost per un material termoplàstic i pols metàl·lica. Aquests filaments, normalment, estan compostos per PLA (Polylactic Acid) amb el que s'hi barreja, amb gran quantitat, pols metàl·lica. Gràcies al polímer es pot aconseguir un punt de fusió baix del filament i, per tant, una simplificació del procés d'impressió. Tot i això, la peça final requereix d'un sinteritzat per a unir la pols metàl·lica i eliminar l'excipient, en aquest cas, el PLA (Maudos, 2021).

Aquest procediment per a imprimir en 3D peces metàl·liques, té un desavantatge molt important de cares al producte final. A causa del sinteritzat final, el PLA eliminat deixa el seu rastre en forma de porositat i, per tant, la peça final posseeix una elevada porositat. Aquest fet pot comprometre la rigidesa del producte i les seves propietats mecàniques. (Maudos, 2021)

És per aquest fet que en l'actualitat s'està treballant en el desenvolupament de sistemes d'impressió 3D basats en el mètode FDM en els quals es faci ús de filament metàl·lic i no de caràcter híbrid. A causa del desenvolupament d'aquest tipus de maquinària l'objectiu d'aquest treball és suplir la necessitat d'un filament de caràcter metàl·lic.

2. DISSENY I DIMENSIONAT D'UNA MATRIU DE TREFILAT

2.1 DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES PEL DISSENY

Per tal de poder desenvolupar i dissenyar la maquinària en qüestió ha fet falta prendre certes decisions que condicionen el resultat final del producte a desenvolupar. Entre aquestes decisions trobem el material a trefilar, la geometria de la filera, l'ús o no de lubricants, etc. A continuació es mostren les decisions preses:

1. Filera

Per a poder definir la geometria més idònia de la filera per al procés es va contactar amb l'empresa Esteves Group, un fabricant de solucions per fileres de trefilatge. L'empresa va recomanar que per a deformar alumini s'emprés una eina amb un angle d'atac d'entre uns 16° - 18°. L'angle d'atac, representat en la Figura 6, és el que es troba en la zona del con de reducció de la filera i és el que inicia la deformació. Per a dimensionar la màquina però s'ha pres l'angle de 18 graus ja que és el que provoca l'augment més significatiu de l'esforç a realitzar per a trefilar.

D'altra banda, l'empresa va recomanar no realitzar el trefilatge d'una sola vegada i passar del diàmetre inicial, del qual parteix el material base, al diàmetre final requerit. Aquesta recomanació es basa en la incapacitat del material d'absorbir tota la deformació sol·licitada en el cas de realitzar el trefilat d'una sola passada. Per tant, recomana un percentatge de reducció del diàmetre relativament baix per a cada passada conjuntament amb un percentatge d'allargament també certament reduït. A continuació es mostren les equacions, facilitades per la mateixa empresa, emprades per a calcular els percentatges de reducció de secció (Eq. 7) i d'allargament (Eq. 8).

$$\Delta S \% = \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_0}\right)^2\right] \cdot 100 \quad \text{Eq. 7}$$

$$\Delta l \% = \left[\left(\frac{d_0}{d_i}\right)^2 - 1\right] \cdot 100 \quad \text{Eq. 8}$$

Les fileres que va recomanar utilitzar són les fileres de diamant policristal·lí, les quals es fabriquen per a trefilar fils des de 0,04 mm de diàmetre fins als 35 mm de diàmetre. Com que el rang de diàmetres des del que es parteix es troba dins el rang anteriorment mencionat, aquestes esdevenen idònies per al procés. Cal destacar que es parteix d'un fil de 3,2 mm de diàmetre i es vol aconseguir un fil de 1,75 mm de diàmetre.

El fabricant també va recomanar aquest tipus de fileres a causa de la possibilitat de introduir-les en processos en calent o amb lubricants i de la possibilitat de trefilar fils ferrosos i no ferrosos. Això és de gran interès per al procés que es vol desenvolupar.

Finalment, com que es van escollir aquestes fileres per al procés, es va sol·licitar al fabricant les dimensions de les fileres, les quals es poden veure en la Figura 25.

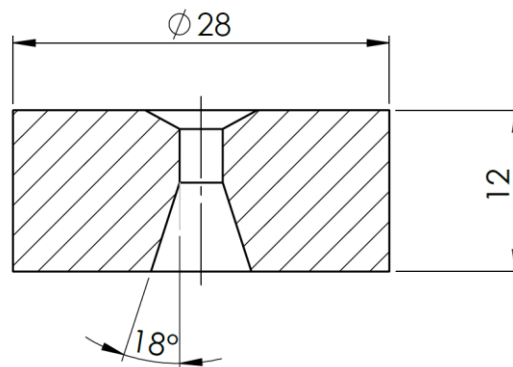


Figura 25. Dimensions de filera Esteves Group de diamant policristal·lí

(Font: Esteves Group)

Per últim, el fabricant va recomanar realitzar l'allotjament de la filera lleugerament més gros en les dues dimensions rellevants, el diàmetre i el gruix. Aquesta diferència permetrà un cert moviment de la filera per a alinear el fil amb l'eina i per a poder trefilar correctament en el cas que el fil no arribi en la direcció perpendicular i centrada en el forat.

2. Lubricació

Per a reduir la fricció entre el material a deformar i l'eina s'ha optat per fer ús de lubricants. En aquest cas s'usarà un lubricant de grafit. L'elecció d'aquest es basa en un estudi realitzat pel Centre de disseny d'aliatges lleugers i tractament de superfície CDAL de la Universitat Politècnica de Catalunya UPC on es compara un lubricant a base de pols ceràmica i un lubricant a base de grafit. Els resultats obtinguts amb el lubricant de grafit eren més favorables de cares al procés d'extrusió realitzat en l'estudi. (Forn, 2010) Com que el procés d'extrusió s'assimila molt al de trefilatge s'usarà el lubricant de grafit amb nom comercial, "Molykote G-Rapid Plus" (Figura 26).



Figura 26. Exempler Molykote G-Rapid Plus

(Font: <https://www.antala.es/productos/molykote-g-rapid-plus-pasta-lubricante-bajo-coeficiente-friccion/>)

3. Velocitat de trefilatge

Al tractar-se d'un equip de trefilat per a produccions a nivell de laboratori, la velocitat de trefilatge no és un paràmetre que tingui cap rellevància ja que no es busca l'eficiència industrial sinó la correcta obtenció d'un producte que suposi un resultat òptim per a la investigació. És per aquest motiu que no es determinarà cap velocitat concreta per al trefilat.

Tot i això, es recomana mantenir una velocitat relativament baixa per a poder controlar altres paràmetres influents en el procés. Sempre i quan aquesta velocitat sigui assumible per la maquinària a la que s'estigui sol·licitant.

4. Recuita - Reglobulització

Per tal de mantenir la tensió de trefilatge en tot el procés i no haver de recalculer-la després de cada passada s'ha optat per fer una recuita del material en cada pas del procés. D'aquesta manera, a cada passada, el material manté les seves propietats mecàniques tot i haver-se endurit en etapes prèvies del procés. A més, al tractar-se d'un tractament de recristal·lització del metall, el material recupera la seva microestructura inicial. Això és de gran interès per al material a trefilar ja que es pretén obtenir la microestructura globular inicial que presenta l'aliatge en el producte final.

Per a obtenir-la cal escalfar el material a una temperatura lleugerament inferior a la temperatura de fusió, és a dir, cal fer una posta en solució. En un aliatge de Al-Si-Mg aquesta temperatura es troba entre el 500°C i els 570°C. (Fresno, 2007) Posant el material a aquesta temperatura s'aconsegueix una concentració màxima de silici i de magnesi en la xarxa d'alumini, sense arribar al punt de fusió. La finalitat d'aquest escalfament és obtenir una solució sòlida amb la màxima concentració d'elements

d'aliatge. Això s'aconsegueix a una temperatura d'entre 520°C i 550°C durant un període de temps d'entre 2 i 8 hores. (Fresno, 2007)

Posteriorment caldrà practicar un envelliment natural, és a dir, deixar refredar el material a temperatura ambient fins que aquest hi arribi.

En el cas que es vulgui treballar en tebi o, inclús, en calent, existeix la possibilitat de no realitzar recuites entre cada passada. Aquest fet seria possible sempre i quan la temperatura de treball fos pròxima a la temperatura de recristal·lització del material, ja que d'aquesta manera s'aconseguiria la mateixa microestructura tant en l'entrada com en la sortida.

5. Temperatura

Aquest factor té molta relació amb la tensió final requerida per poder trefilar el fil. Per tal de dimensionar els components s'ha optat per no aplicar temperatura en el procés de disseny. Tot i aquest fet, en el procés final hi cap la possibilitat de aplicar temperatura tant a el material a deformar com en els utilatges. Per conseqüència de l'augment de la temperatura, la tensió requerida serà menor que la tensió de trefilatge en fred. Per aquest motiu els utilatges seguiran tenint viabilitat en el procés.

Per al trefilatge en calent es recomana aplicar una temperatura entre els 330°C i els 550°C. (Misiólek, 2005) Aquest rang de temperatures és el més òptim per a treballar l'alumini en calent. Cal destacar que aquest interval és una aproximació del treball en calent realitzable a la majoria d'aliatges destinats a la deformació plàstica.

En aquest cas, com que es vol trefilar un aliatge sovint utilitzat en fundició, el rang de temperatures en el que es permetrà treballar serà entre els 25°C i els 405°C. Per a aquest rang de temperatures s'han establert 3 intervals de treball: treball en fred, treball en tebi i treball en calent. (Taula 4)

Taula 4. Rangs de temperatures de treball per al trefilat

Tipus de treball	Rang de temperatures / °C
Treball en fred ($> 0,3 T_f$)	25 - 173
Treball en tebi ($0,3 T_f - 0,5 T_f$)	173 - 289
Treball en calent ($> 0,7 T_f$)	289 - 405

6. Passos

Per a poder assolir el diàmetre desitjat, que en aquest cas s'ha estipulat en 1,75 mm de diàmetre, cal definir quins seran els diàmetres de cada pas de reducció i quin serà el nombre total de passos. En aquest cas s'ha optat per a realitzar 3 passos amb els següents diàmetres (Taula 5).

Taula 5. Taula de diàmetres de cada pas amb percentatges de allargament i reducció de secció.

#	d_i / mm	ΔS %	Δl %
0	3,2		
1	2,62	33,12	49,52
2	2,14	33,13	49,55
3	1,75	33,13	49,54

S'han escollit aquests diàmetres ja que els productes obtinguts després de cada passada presenten el mateix percentatge de reducció de secció i el mateix percentatge d'allargament. Aquest fet és interessant a nivell de disseny ja que implicarà les mateixes condicions per a cada pas del procés. Fora bo destacar que el càlcul dels percentatges s'ha fet amb les respectives equacions (Eq. 7 i Eq. 8).

7. Material per a la fabricació del utillatge

Per a poder construir l'utillatge cal emprar un material amb una bona resistència a tracció tant en fred com en calent, per tal que mantingui la seva integritat estructural i suporti els esforços de tracció aplicats sense que es deformi. També, cal que tingui una bona resistència a les altes temperatures ja que en el procés hi cap la possibilitat de treballar fins als 405°C.

Per a la construcció d'aquest utillatge s'ha optat per usar un acer AISI H13. Un material àmpliament utilitzat en equips de treball en calent, com per exemple: matrius de forja, eines d'extrusió en calent i motlles de fundició a pressió. Les eines fabricades amb acer AISI H13 poden ser usades a temperatures de fins a 540°C aproximadament amb exposicions breus de fins a 595°C. (Sisa, 2012) Les temperatures que suporta aquest material són adients per les temperatures plantejades per al procés de trefilat.

Pel que fa a les seves característiques és un material amb una alta tenacitat, una bona resistència a les temperatures i a les fatigues tèrmiques, una bona resistència al desgast i una bona resistència al xoc tèrmic. (Maudos, 2021)

Per a calcular les dimensions dels elements s'utilitzarà el paràmetre del límit elàstic. Aquesta propietat mecànica, pròpia dels materials, indica la tensió màxima que es pot aplicar a un material sense que aquest pateixi deformacions plàstiques, és a dir, que es deformi permanentment.

Aquest paràmetre té una variabilitat molt elevada quan al material se l'hi apliquen diferents tractaments tèrmics o quan treballa a temperatures elevades. (Tekmen, 2005)

Com que l'interès és dimensionar els elements en les condicions més severes de treball caldrà definir el valor del límit elàstic quan aquest estigui treballant en calent. El valor que se s'emprarà per als càlculs és de 900MPa. Aquest es pot observar en la Figura 27 en el material "H13 (as Quenched)". Aquest paràmetre s'ha obtingut assajant el material a tracció a una temperatura de 500°C. Cal destacar, que el material escollit caldrà practicar-li un tractament de tremp on prèviament s'escalfarà a 900°C en 30 min i posteriorment es refredarà en oli. (Tekmen, 2005)

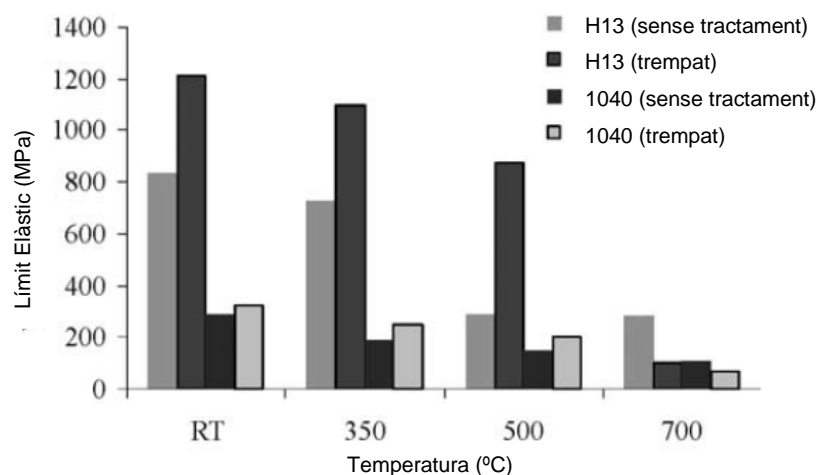


Figura 27. Efecte de la temperatura al límit elàstic en AISI H13

(Font: (Tekmen, 2005))

Fora bo comentar, que amb la finalitat de millorar la resistència a l'oxidació i les propietats mecàniques a altes temperatures, és recomanable aplicar tractaments de superfície. (Tekmen, 2005)

2.2 MATERIAL A TREFILAR

Per a iniciar el trefilatge es partirà d'un filament d'alumini que correspon a un aliatge AlSi12. Aquest filament està constituït per un aliatge d'alumini anomenat (E4047 / Al 4047) és un elèctrode comercial de diàmetre 3,2 mm que s'utilitza per a la soldadura d'aliatges Al-Mg-Si. D'aplicació en construccions d'alumini en general i components a la indústria de l'automòbil. S'ha pogut obtenir aquesta matèria primera en aquest format i, per tant, aquesta és la raó d'ús. Tot i que l'objectiu a llarg termini es utilitzar un fil de l'aliatge A356 amb estructura globular.

Les característiques d'aquest aliatge d'alumini A356 s'empraran per a dimensionar i dissenyar els components que duran a terme la deformació. Aquest material és un aliatge d'alumini i silici, tot i que també hi ha una part important de magnesi. A continuació es mostra la Taula 6 on es llista la composició química d'aquest aliatge.

Taula 6. Composició Química en % en pes de l'aliatge A356 (Geetha, 2014)

	Si	Mg	Ti	Cu	Fe	Mn	Zn	Al
A356	6 - 7.5%	0.45% màx.	0.25% màx.	0.25% màx.	0.6% màx.	0.35% màx.	0.35% màx.	90 - 93%

Fora bo comentar que els components de la màquina també es dissenyaran per a deformar alumini A356 obtingut per la tècnica de "Sub Liquidus Casting (SLC)". Aquest aliatge d'alumini A356 però, té una microestructura diferent a l'obtinguda per processos convencionals de foneria com poden ser injecció a alta pressió o colada en coquilla metàl·lica. Aquesta microestructura es caracteritza per la presència de glòbuls de fase alfa rodejats de microconstituent eutèctic. (Menargues, 2011)

L'aliatge d'alumini A356 obtingut en estat semisòlid pel procés "Sub Liquidus Casting (SLC)" presenta les següents propietats mecàniques. (Taula 7)

Taula 7. Propietats mecàniques de l'aliatge A356 SLC a diferents velocitats d'assaig (Menargues, 2011)

A356 SLC	V / m·min ⁻¹	K / MPa	n	E / GPa	Rp0,2 / MPa	Rm / MPa	ε/%
	5	435	0,26	64	99	216	12,5
	100	463	0,24	62	113	234	15,9
	150	476	0,23	68	129	248	14,4

Aquest material presenta una bona resistència a la corrosió i una bona soldabilitat, essent aquesta la capacitat d'un material per a ser soldat amb un altre. A més, té unes bones propietats mecàniques tot i que es poden millorar amb l'aplicació de tractaments tèrmics com el T5 o el T6. (Maudos, 2021)

L'alumini A356 és un material molt utilitzat per a fabricar peces en la indústria automobilística i aeronàutica. Això es deu a la seva versatilitat i bona relació entre lleugeresa i bones propietats mecàniques. Tot i que principalment s'utilitza per fer peces de fosa, en aquest cas es busca fabricar-ne un filament per a fabricar peces mitjançant tècniques de fabricació additiva.

2.3 CÀLCUL TENSIÓ I FORÇA DE TREFILATGE

Per a poder dimensionar els components que formaran part de la maquinària el primer de tot i, imprescindible, és calcular la tensió mínima necessària per a deformar el material. Per a això s'ha fet ús de la Eq. 2 i s'ha calculat la tensió de trefilat per a cada pas del procés. El càlcul de la tensió es realitza per al treball en fred ja que suposarà les condicions de treball més severes.

Per a fer-ho, primer s'ha calculat la tensió de fluència mitja amb les Eq. 4, Eq. 5 i Eq. 6, on s'hi han introduït les propietats mecàniques en funció de la velocitat d'assaig de l'aliatge d'alumini A356 (Taula 7) i les dades rellevants de cada pas del procés (Taula 8). Tot això s'ha realitzat en la Taula 9.

Taula 8. Diàmetres inicials i finals per a cada pas del procés i quocient fraccional (r)

#	d_0 / mm	d_i / mm	$r = d_i/d_0$
0	3,2	3,2	1,0
1	3,2	2,62	0,82
2	2,62	2,14	0,82
3	2,14	1,75	0,82

Fora bo comentar que per al càlcul del paràmetre B s'ha pres com a angle d'atac 18° , essent aquest l'angle que proporciona les condicions més severes de deformació, i s'ha pres com a coeficient de fregament entre el material i la filera 0,058, el qual ha estat obtingut prèviament. El resultat d'aquesta constant és el de la Eq. 9.

$$B = \mu / \tan \alpha \rightarrow B = 0,058 / \tan 18 = 0,178506 = 0,179$$

Eq. 9

Taula 9. Taula de càlcul de la tensió de fluència mitja per a cada pas del procés en funció de la velocitat d'assaig per a l'obtenció de les propietats mecàniques

#	V / m/min	Y / MPa	Y ₀ / MPa	Ȳ / MPa
1	5	472	-367	299
	100	512	-388	337
	150	542	-337	378
2	5	472	-367	299
	100	511	-388	337
	150	542	-337	378
3	5	472	-367	299
	100	511	-388	337
	150	542	-337	378

Com que la tensió de fluència mitja varia molt poc per a cada pas i velocitat d'assaig, s'han pres els valors de les tensions mitjanes més altes per a calcular les tensions de trefilat. Per aquest motiu s'han pres els valors de la tensió de fluència mitjana del primer pas.

Un cop s'ha calculat la tensió de fluència, ja es pot calcular la tensió de trefilatge. Per a això, es necessitaran els paràmetres decidits en apartats anteriors però que tenen influència en el càlcul. Aquests són: l'angle d'atac (α) i el coeficient de fregament (μ). Essent, respectivament, 18° i 0,058.

Per a realitzar el càlcul s'ha fet ús de la Eq. 2 i s'han realitzat diverses taules on s'hi poden trobar les tensions de trefilat per a cada pas. (Taula 10, Taula 11, Taula 12) A cada taula l'hi correspon un valor diferent de tensió mitjana de fluència tal i com s'ha obtingut en el pas anterior.

Taula 10. Tensions de trefilat per a $\bar{Y} = 299$ MPa

		di/mm			
		3,2	2,62	2,14	1,75
d0 / mm	A0 / mm ²	Ai/mm ²			
		8,042	5,379	3,597	2,405
3,2	8,042	0	137 MPa	264 MPa	383 MPa
2,62	5,379		0	137 MPa	264 MPa
2,14	3,597			0	137 MPa
1,75	2,405				0

Taula 11. Tensions de trefilat per a $\bar{Y} = 337$ MPa

		di/mm			
		3,2	2,62	2,14	1,75
d0 / mm	A0 / mm ²	Ai/mm ²			
		8,042	5,379	3,597	2,405
3,2	8,042	0	154 MPa	298 MPa	432 MPa
2,62	5,379		0	154 MPa	298 MPa
2,14	3,597			0	154 MPa
1,75	2,405				0

Taula 12. Tensions de trefilat per a $\bar{Y} = 378$ MPa

		di/mm			
		3,2	2,62	2,14	1,75
d0 / mm	A0 / mm ²	Ai/mm ²			
		8,042	5,379	3,597	2,405
3,2	8,042	0	173 MPa	334 MPa	483 MPa
2,62	5,379		0	173 MPa	334 MPa
2,14	3,597			0	173 MPa
1,75	2,405				0

Després de realitzar els càlculs pertinents, s'ha trobat que, sempre i quan es respectin els passos estipulats, la tensió de trefilat mínima per a deformar el material amb seguretat és de 173 MPa.

Si es pren aquesta dada i es multiplica per l'àrea obtinguda del fil (Eq. 10), s'obté la força de trefilat.

$$F_t = \sigma_t \cdot A_i = MPa \cdot mm^2 = N \quad \text{Eq. 10}$$

Si es posen totes les tensions obtingudes i s'aplica l'equació anterior amb el diàmetre obtingut per a cada pas en una taula, es pot observar quina serà la força màxima que haurà de realitzar la màquina. (Taula 13)

Taula 13. Forces de trefilat obtingudes a partir de les diferents tensions de trefilat

\bar{Y}	σ_t / MPa	A_i / mm^2	F_t / N
299	137	5,38	736
	137	3,60	492
	137	2,41	329
337	154	5,38	830
	154	3,60	556
	154	2,41	371
378	173	5,38	930
	173	3,60	622
	173	2,41	416

En aquesta taula es pot observar com la força màxima que haurà de realitzar la màquina serà de 930 N.

2.4 INNOVACIÓ

L'objectiu principal del treball és dissenyar una màquina que sigui capaç de trefilar fil d'alumini. Tot i que inicialment s'esperava dissenyar una màquina amb totes i cadascuna de les seves parts tradicionals, fet que suposava un gran volum de treball i un cost molt elevat ja que no es disposava de cap dels recursos necessaris per construir-la i hagués fet falta comprar-ho tot, finalment s'ha optat per emprendre una altra via.

Un cop calculada la tensió de trefilat s'ha pogut observar que no és massa elevada i, per tant, és assumible per una de les màquines per realitzar assajos de tracció que disposa el CDAL-UPC (Centre de Disseny d'Aliatges Lleugers i tractaments de superfície). Com que el procés es basa en estirar un fil i, per conseqüència, aplicar un esforç de tracció, una màquina per realitzar assajos de tracció esdevé idònia per al procés a desenvolupar.

El fet d'escollir una màquina de tracció pel procés, planteja un repte. Les màquines per realitzar aquests assajos no disposen de utillatges per a allotjar una filera i trefilar. És per aquest motiu, que el repte es basa en dissenyar un utillatge que s'adapti a la màquina i permeti estirar el fil deformant-lo de forma segura i senzilla. A més, ha de permetre ser escalfat i, per tant, permetre l'escalfament de la matèria prima.

Com un dels objectius és obtenir una màquina per a produccions a nivell de laboratori, dissenyar un utillatge per a una màquina ja existent i capaç d'assolir les càrregues calculades suposa un clar avantatge econòmic i és que, en aquest cas, no caldrà comprar massa elements externs sinó dissenyar els justos i necessaris i fabricar-los.

2.5 RECURSOS DISPONIBLES

Per tal de poder desenvolupar aquest utilatge plantejat anteriorment, cal conèixer quins són els recursos disponibles. Al CDAL, en un dels laboratoris, es disposa d'una màquina per realitzar assajos de tracció i de compressió en diferents ambients. Aquesta és de la marca Zwick-Roell i és el model Z100 TL-3S (Figura 28). La màquina és capaç de aplicar forces de fins a 100kN. Tot i això, per seguretat, es treballa a un 85% d'aquesta càrrega màxima, per tant, la força màxima que pot aplicar a un assaig és de 85kN.



Figura 28. Màquina per assajos de tracció Zwick Z100 TL-3S

(Font: CDAL-UPC)

Aquesta màquina disposa d'una cambra climàtica que permet escalfar o refredar les mostres que es vulguin assajar. Aquest dispositiu aliè, pot assolir temperatures de fins a 200°C. Al no ser una temperatura suficientment elevada per a l'interès del procés, es desestima l'ús d'aquest equip.

Com que la cambra climàtica no assoleix la temperatura desitjada, s'implementarà un sistema d'escalfament diferent. En aquest cas, en el mateix laboratori on es troba situada la màquina de tracció, també s'hi pot trobar un forn d'inducció amb estacions d'escalfament mòbils de la marca Ambrell. Aquest és el model Ambrell Ekoheat 30/100 i compta amb dues estacions d'escalfament independents (Figura 29).



Figura 29. Forn d'inducció Ambrell Ekoheat 30/100

(Font: CDAL-UPC)

2.6 DISSENY CONCEPTUAL DE L'UTILLATGE

Per al desenvolupament de l'utillatge primer cal estudiar l'escenari on anirà situat, quines funcions desenvoluparà i quines propietats cal que tingui.

1. Situació

Aquest utillatge anirà situat a la part inferior de la màquina de tracció. Aquesta disposa d'un sistema d'ancoratge per a utillatges propis que funciona amb un passador, per tal que aquests no surtin de lloc durant els assajos (Figura 30). Aquest passador és capaç de suportar les càrregues dels assajos que es duen a terme.

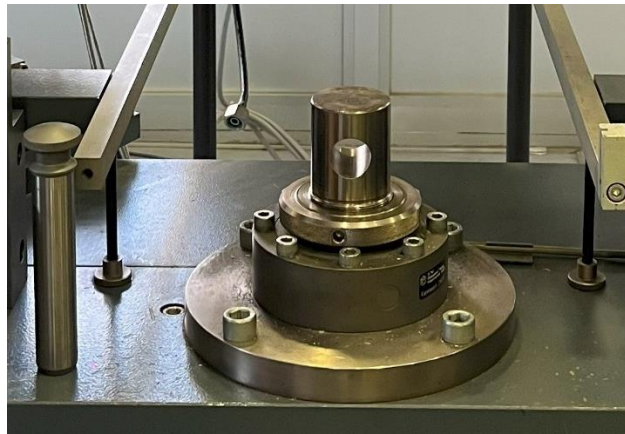


Figura 30. Unió inferior per a utillatges i passador de la màquina de tracció Zwick

(Font: Elaboració Pròpia)

Per aquest motiu, cal que l'utillatge a dissenyar sigui cilíndric i disposi d'un forat transversal per a fixar-lo en la posició correcta i el pugui travessar el mateix passador utilitzat per a la resta d'utillatges.

2. Funcions a desenvolupar

Per a poder trefilar fil d'alumini cal que l'utillatge desenvolupi una sèrie de funcions secundàries que sumades donen com a resultat el procés. Primer de tot cal que sigui capaç d'allotjar les fileres seleccionades per al procés en una posició correcta i idònia per a poder estirar el fil des de la part superior. En segon lloc, cal que disposi d'una geometria que permeti inserir el fil primari i aquest pugui arribar fins a la filera. Per últim, cal que aquest sigui segur de cares a l'usuari que l'utilitzi.

3. Propietats

A causa dels estímuls externs que pugui rebre l'utillatge, cal que aquest posseeixi unes propietats concretes per a suplir les necessitats imposades pel procés.

En primer lloc, cal que aquest disposi d'una bona resistència mecànica ja que es trobarà sotmès a uns esforços que el podrien deformar o trencar. En segon lloc cal que tingui una bona conductivitat tèrmica ja que dins les característiques del procés hi cap la possibilitat de treballar en calent. Per últim, cal que tingui una bona resistència a la corrosió ja que si es troba exposat a altes temperatures, podria aparèixer corrosió amb més facilitat i comprometre la integritat del producte.

4. Fixació superior

Per a realitzar el trefilat, al suport de la columna superior s'hi acoblarà un utillatge propi de la màquina de tracció que permet subjectar les mostres a assajar (Figura 31) i, per tant, el fil a trefilar. Aquest utillatge, s'acobla mitjançant una rosca al pont superior.

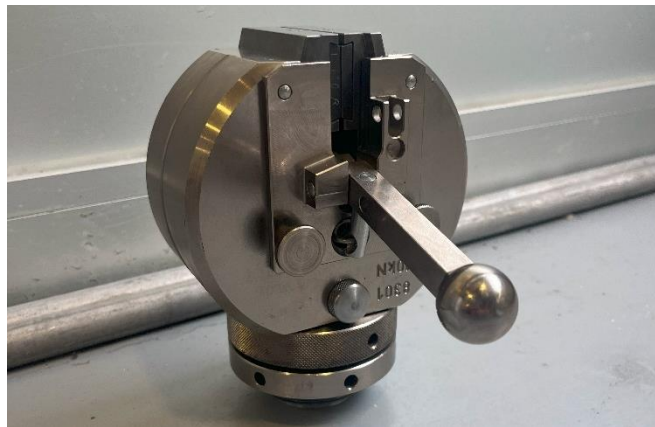


Figura 31. Mordassa superior pròpia màquina de tracció Zwick

(Font: Elaboració Pròpia)

5. Disseny conceptual

Així doncs el disseny conceptual del producte final és la suma de tres components: la màquina de tracció, l'estació d'escalfament del forn d'inducció i la matriu/utiltatge que allotja la filera. (Figura 32) Si ajuntem els tres components obtenim el disseny conceptual del producte final. (Figura 33) L'utiltatge dissenyat està pensat per a ser envoltat per la bobina de una de les estacions d'escalfament del forn d'inducció. Aquesta estació, es recolza sobre els rails de la cambra climàtica de la pròpia màquina d'inducció.

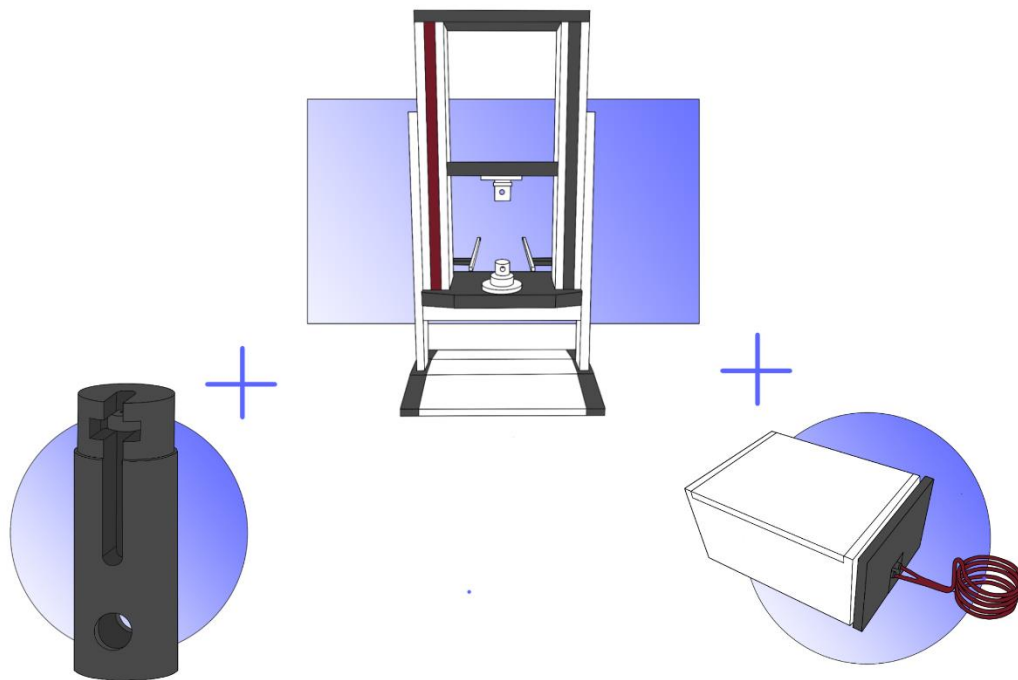


Figura 32. Representació gràfica components producte final

(Font: Elaboració Pròpia)

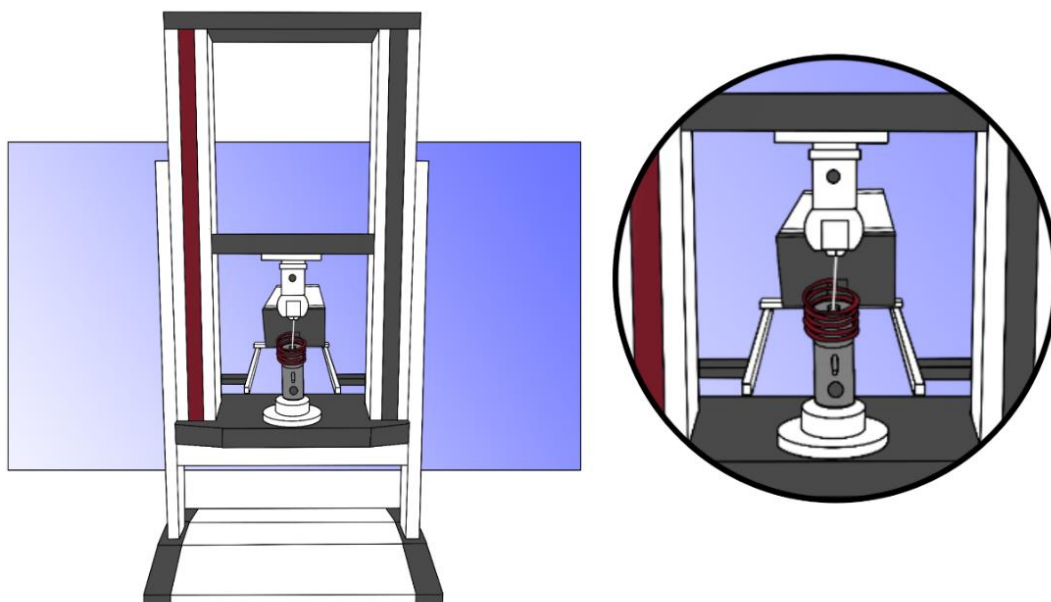


Figura 33. Representació gràfica procés de trefilat

(Font: Elaboració Pròpia)

2.7 DISSENY DE L'UTILLATGE

L'utillatge dissenyat està format per un cilindre de diàmetre 80mm mecanitzat el qual consta de tres zones diferenciades.

La primera zona, la que ocupa la posició més inferior, té per objectiu fixar l'utillatge en la unió inferior de la màquina de tracció. Això ho aconsegueix gràcies al forat intern que posseeix i el forat transversal. Aquest últim, permet la fixació total i bloqueja l'element de qualsevol moviment gràcies al passador que el travessa. Aquesta regió s'adapta als 60 mm de diàmetre de l'eix de la unió inferior de la màquina de tracció i als 30 mm de diàmetre del passador. La profunditat del primer forat, en aquest cas, és la suficient com per fixar l'utillatge. El segon forat, el transversal, travessa per complet la matriu.

La segona zona, la central, té per objectiu allotjar el material a trefilar i donar suport estructural al utillatge. A més, permet l'accés per a enfil·lar la filera i poder començar el procés. Aquest accés ve donat per la ranura que disposa en una de les seves cares. La longitud d'aquesta zona podria ser indefinida, però en aquest cas s'ha determinat en uns 100 mm per a allotjar el filament i per a fer coincidir la bobina de l'estació d'escalfament, recolzada sobre els rails de la cambra climàtica, amb la tercera i última regió.

Per últim, però no per això menys important, la tercera zona, la superior, té per objectiu allotjar la filera per on passarà el material a trefilar. Addicionalment, aquesta zona permet l'intercanvi manual de les diferents fileres que intervenen en el procés. Les dimensions d'aquesta regió coincideixen amb l'amplada de la bobina del forn, per a garantir un correcte escalfament. Cal destacar que les dimensions del forat on va allotjada la filera són lleugerament superiors a les dimensions de la filera, tal i com va recomanar el fabricant de fileres, amb la finalitat de poder utilitzar fileres de diferents mides i també per a garantir un cert joc.

A més l'utillatge inclou una corona superior, la qual va encaixada en la tercera zona i ofereix seguretat al producte. Aquesta té la funció de bloquejar la sortida de la filera en el cas que sorgís algun problema.

En el cas que es vulguin consultar les dimensions específiques de cada regió, caldrà consultar els plànols constructius els quals es poden trobar als annexos.

Disseny i validació d'un equip de trefilat en calent de fil d'alumini per a impressió 3D
Enric Guisado Corcoll

A continuació es poden trobar les figures tant de les dimensions de la màquina de tracció (Figura 34) com del desenvolupament 3D del producte obtingut (Figura 35, Figura 36, Figura 37). Les imatges del desenvolupament 3D han estat obtingudes mitjançant un foto-renderitzat realitzat amb el programari KeyShot 9. Aquestes tenen un caràcter il·lustratiu i no tenen cap mena de transcendència industrial.

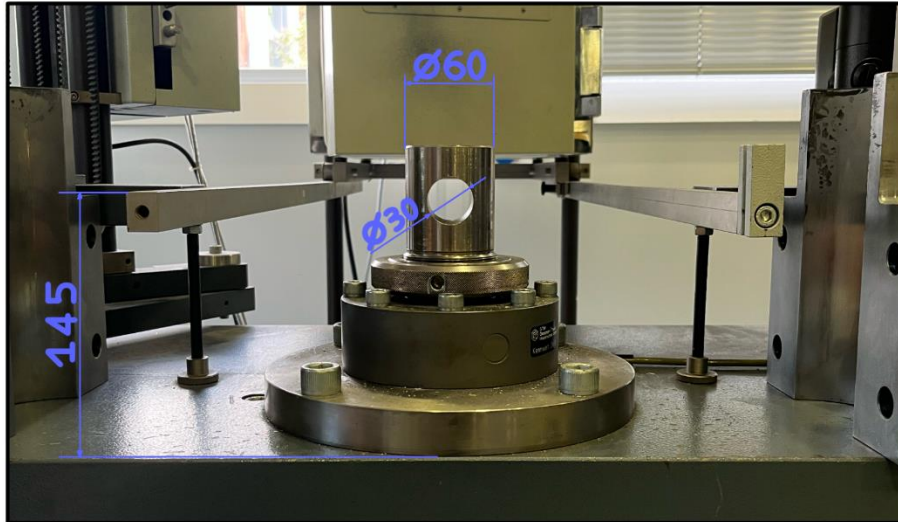


Figura 34. Representació gràfica dimensions màquina de tracció Zwick

(Font: Elaboració Pròpia)



Figura 35. Representació gràfica esclatat peces de l'utilatge per al trefilat

(Font: Elaboració Pròpia)



Figura 36. Representació gràfica utillatge, corona i filera
(Font: Elaboració Pròpia)



Figura 37. Representació gràfica utillatge muntat
(Font: Elaboració Pròpia)

2.8 CÀLCULS

2.8.1 CONDICIONS LÍMIT

Per a dimensionar l'utilatge cal saber quines seran les condicions límit a les quals podrà estar sotmès l'utilatge. Aquestes suposaran un punt crític per a la integritat del producte, tot i que disposen d'un marge de seguretat. Per a això s'han definit els següents paràmetres (Taula 14):

Taula 14. Condicions límit a les que l'utilatge pot estar sotmès

Paràmetre	Valor
Temperatura màxima de treball	500 °C
Límit elàstic a 500°C	900 MPa
Força màxima de tracció	49 kN

Com que en el procés hi cap la possibilitat de treballar en calent, s'ha establert en 500°C la temperatura límit de treball. Encara que el procés estableix com a temperatura màxima de treball 405°C, s'ha pogut obtenir el valor del límit elàstic a una temperatura superior i per això s'ha establert així el límit. El límit elàstic s'ha obtingut prèviament en l'apartat 2.1.

Respecte la força màxima de tracció, s'ha volgut donar un marge notòriament superior per a oferir versatilitat en el producte. Tot i que la força per a trefilar l'alumini no supera els 1000N s'ha establert com a força màxima la meitat de la capacitat de càrrega que ofereix la màquina de tracció per a poder trefilar altres materials en un futur en el cas que sigui necessari.

2.8.2 CÀLCUL ÀREA MÍNIMA PER A ESFORÇ A TRACCIÓ LÍMIT

Un cop definides les condicions límit de treball cal determinar quin serà l'esforç màxim que pot suportar l'utilatge sense deformar-se ni trencar-se. Com que es tracta d'un element que treballa a tracció, l'esforç que suportarà es pot calcular amb la següent equació. (Eq. 11)

$$\sigma = F/A = N/mm^2 = MPa$$

Eq. 11

On σ representa la tensió a la que esta sotmesa l'àrea A i F representa la força aplicada en aquesta.

Aquesta equació descriu la força que es capaç de suportar una àrea determinada. Com que en aquest cas s'ha determinat en 900 MPa la tensió màxima que podrà suportar sense que es deformi permanentment, ara l'interès rau en trobar quina serà la secció mínima que podrà suportar aquesta tensió. Per a això, cal aïllar l'àrea de la Eq. 11 per a poder conèixer quin valor tindrà per a resistir aquesta tensió. (Eq. 12) Així doncs, si es substitueixen els valors de la Taula 14 en la Eq. 12 es podrà trobar aquest paràmetre (Eq. 13).

$$A = F/\sigma = N/MPa = mm^2 \quad \text{Eq. 12}$$

$$A = 49000/900 = 54,4 mm^2 \quad \text{Eq. 13}$$

Per tant, la secció resistent mínima ha de ser de 54,4 mm² per tal de suportar els 900 MPa.

2.9 VALIDACIÓ

2.9.1 VALIDACIÓ SECCIÓ MÍNIMA RESISTENT

Tal i com s'ha calculat en l'apartat anterior la secció mínima resistent ha de ser de 54,4 mm². Per a saber si l'utilatge compleix amb aquest requeriment només cal observar el disseny.

Si es mira la secció lateral del producte es pot observar com a la part inferior, just per sota del forat del passador, hi ha la secció més petita i, per tant, més crítica. Mitjançant el programari Solidworks s'ha calculat l'àrea d'aquesta secció. En aquest cas, es troba dividida a dues bandes ja que el producte és cilíndric.

Observant la Figura 38 es pot veure com l'àrea d'una de les bandes té un valor de 229,84 mm². Si es sumen ambdues, les quals són idèntiques, la secció total és de 459,68 mm².

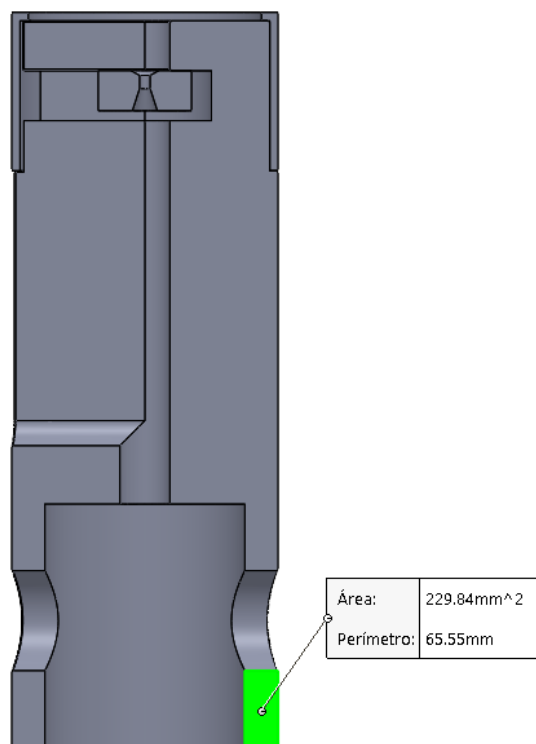


Figura 38. Representació gràfica àrea crítica

(Font: Elaboració Pròpia)

Com que la suma de la secció crítica és notòriament superior a la secció mínima requerida per suportar la tensió de 900MPa, el producte mantindrà la seva integritat i no es deformarà ni trencarà en cap cas.

2.9.2 SIMULACIONS

Per tal de validar el producte també s'ha optat per realitzar simulacions d'esforços amb el programari Solidworks. La finalitat és conèixer quins punts de l'utilatge seran els que suportaran un esforç més elevat i si patiran o no deformacions. En aquest cas s'han realitzat dues simulacions: una per a comprovar l'estat de l'utilatge amb la tensió del procés en fred i una altra amb les condicions límit plantejades anteriorment. Aquests dos casos mostraran el comportament tant en una situació límit com en una situació normal.

Per a dur a terme aquestes simulacions primer de tot s'ha aplicat un mallat tridimensional al model amb la finalitat de poder realitzar els càlculs amb el mètode d'elements finits (MEF). S'ha aplicat un mallat estàndard amb una mida de 5 mm per a cada element. (Figura 39)

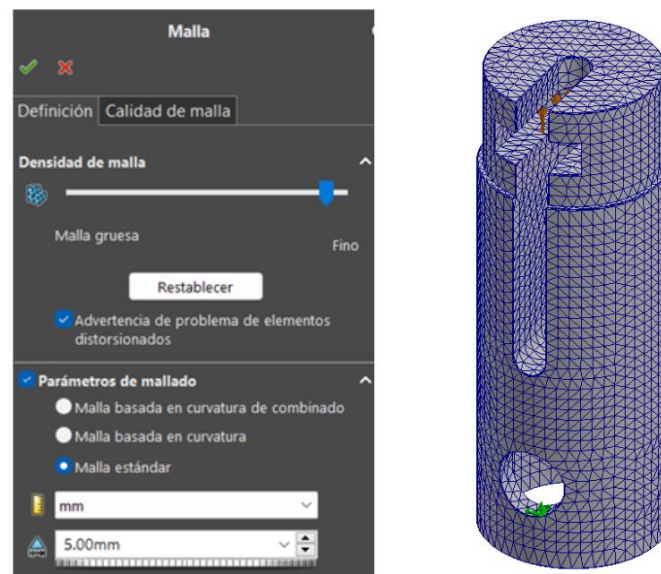


Figura 39. Mallat element a simular

(Font: Elaboració Pròpia)

Seguidament, s'ha determinat quin seria el punt de subjecció. Aquest ha estat la cara interna del forat del passador per on es subjecta l'utilatge a la màquina de tracció. (Figura 40)

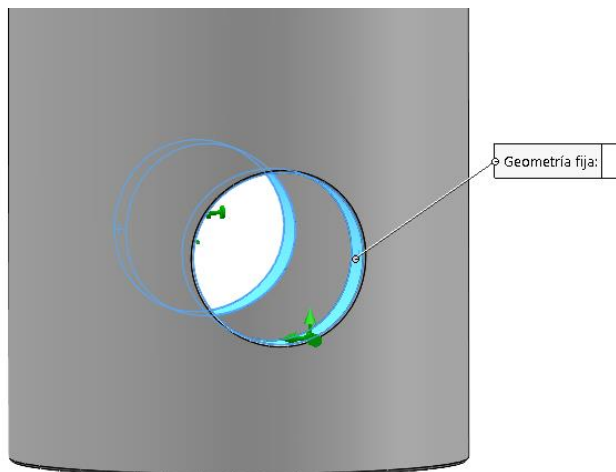


Figura 40. Representació punts de subjecció element a simular

(Font: Elaboració Pròpia)

Un cop definits aquests paràmetres, s'ha passat a definir el material i la càrrega que s'aplicarà en cadascun dels estudis.

2.9.2.1 SIMULACIÓ CONDICIONS NORMALS

Per a la simulació en condicions normals s'ha definit el material de l'utilatge com un AISI H13. Com que la biblioteca de materials del programari no disposava d'aquest, s'ha introduït manualment les propietats. (Figura 41) Per a aquest cas, i com que s'està treballant en fred (25 °C), el límit elàstic s'ha definit en 1200 MPa, tal i com es pot veure en la Figura 27.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	210000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3	N/D
Módulo cortante	810000	N/mm ²
Densidad de masa	7800	kg/m ³
Límite de tracción	1400	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	1200	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	24.3	W/(m·K)
Calor específico	460	J/(kg·K)

Figura 41. Propietats AISI H13 a temperatura ambient

(Font: (Tekmen, 2005))

Pel que fa a la força, s'ha introduït la de trefilatge calculada anteriorment, la qual té un valor de 930N. Aquesta s'ha situat en la zona de contacte entre la filera i l'utilatge, ja que és el punt d'unió entre aquestes dues peces. (Figura 42)

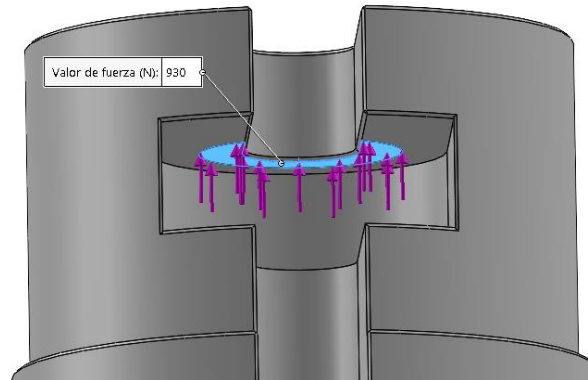


Figura 42. Distribució força de trefilat en condicions normals

(Font: Elaboració Pròpia)

Un cop s'han definit tots els paràmetres necessaris per a dur a terme la simulació, s'ha procedit a realitzar l'estudi. A continuació es mostren els resultats obtinguts:

1. Tensions

Pel que fa a les tensions es pot veure en la (Figura 43) com hi ha un augment de la tensió en la part més superior de l'utilatge. Tot i això, aquesta tensió frega els 5 MPa i no suposa cap tipus de perill per al producte. En la cara interna de l'allotjament també trobem un augment de les tensions però aquestes no són perjudicials pel producte ja que es troben per sota de la tensió comentada anteriorment. (Figura 44)

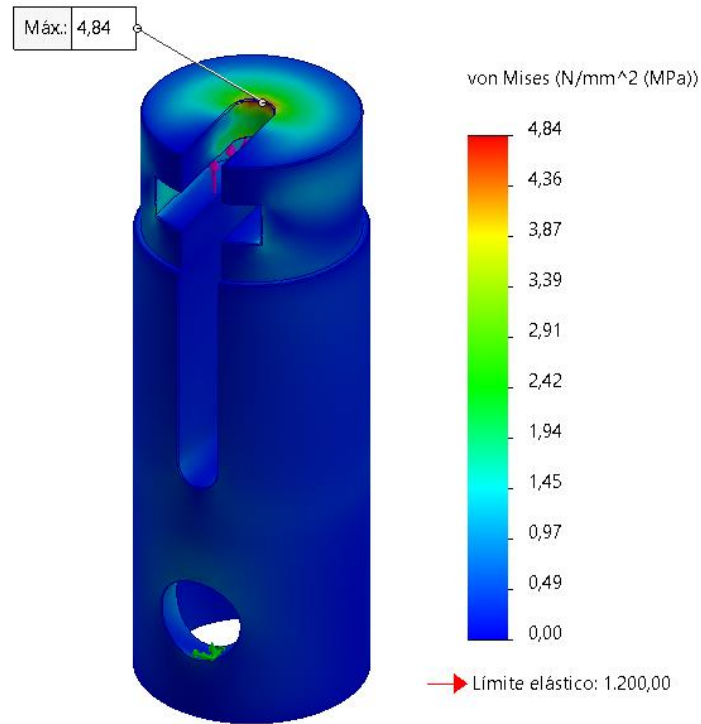


Figura 43. Simulació tensions utilatge en condicions normals

(Font: Elaboració Pròpia)

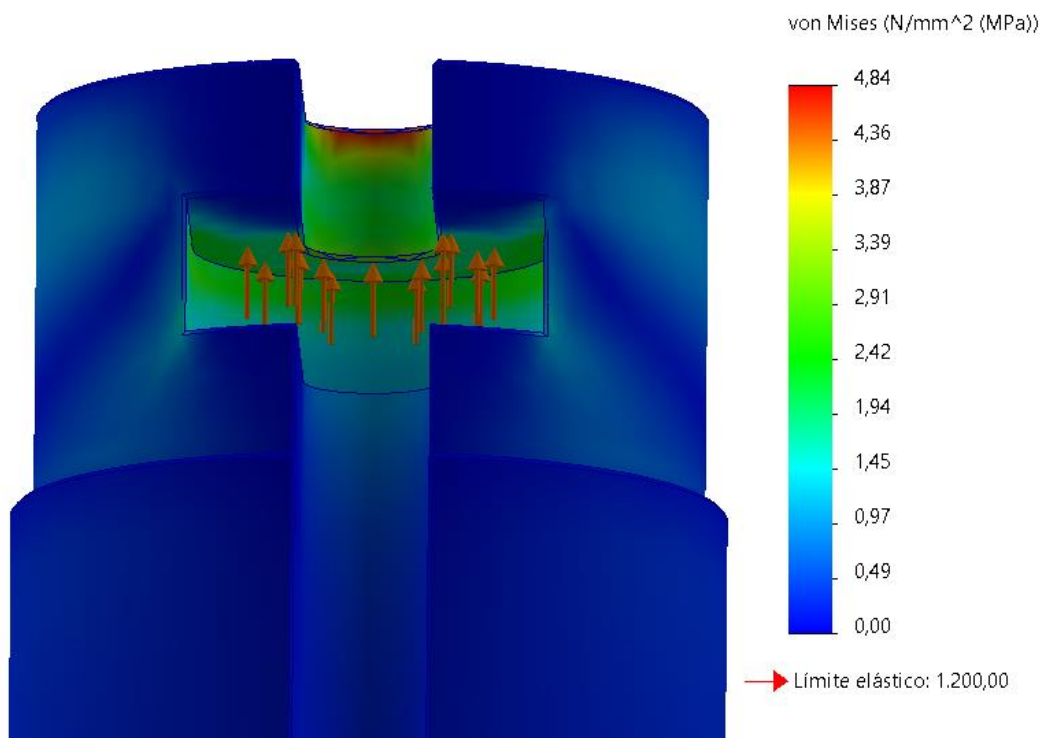


Figura 44. Detall simulació tensions utilatge en condicions normals

(Font: Elaboració Pròpia)

2. Deformacions

Pel que fa a les deformacions aquestes tenen una distribució similar a les tensions, però la deformació més elevada es troba en la cara interna de l'allotjament ja que és el punt de contacte amb la filera. En aquest cas, no superen els $8 \cdot 10^{-4}$ mm. (Figura 45)

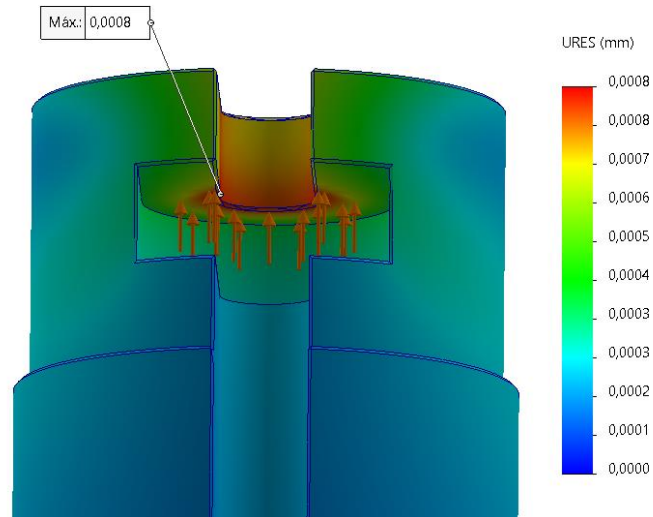


Figura 45. Simulació de deformacions utilitzada en condicions normals

(Font: Elaboració Pròpia)

2.9.2.2 SIMULACIÓ CONDICIONS LÍMIT

Per a la simulació en condicions límit s'ha definit el mateix material que en l'anterior cas però s'han hagut de variar les propietats prèviament introduïdes en el programa per a que aquestes anessin d'acord amb les condicions límit. En aquest cas, i com s'ha vist anteriorment, al treballar en calent ($500 \text{ }^\circ\text{C}$), s'ha definit el límit elàstic en 900 MPa. (Figura 46)

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	210000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3	N/D
Módulo cortante	810000	N/mm ²
Densidad de masa	7800	kg/m ³
Límite de tracción		N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	900	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	24.3	W/(m·K)
Calor específico	460	J/(kg·K)

Figura 46. Propietats AISI H13 a 500°C

(Font: (Tekmen, 2005))

Pel que fa a la força de trefilat, s'ha establert en 49000N tal i com indiquen les condicions límit. Aquesta, un cop més, s'ha situat en la zona de contacte entre la filera i l'utilatge, ja que es el punt d'unió entre aquestes dues peces.

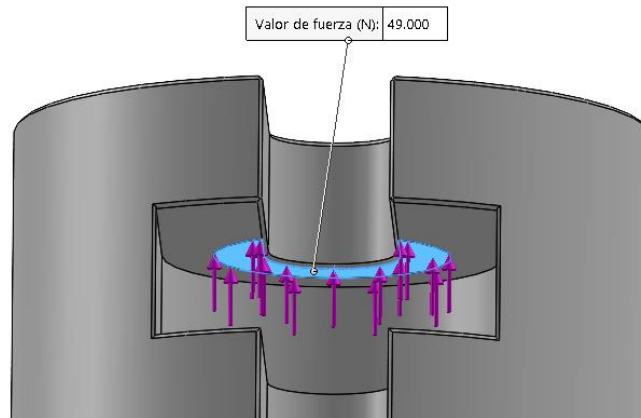


Figura 47. Distribució força de trefilat en condicions límit
(Font: Elaboració Pròpia)

De nou, amb tots els paràmetres necessaris per a dur a terme la simulació definits, s'ha procedit a realitzar l'estudi. A continuació es mostren els resultats obtinguts:

1. Tensions

Pel que fa a les tensions es pot veure en la (Figura 48) com hi ha un augment de la tensió en la part més superior de l'utilatge. En aquest cas, i a causa del menor límit elàstic i la major força aplicada, la tensió ronda entorn els 255 MPa. Tot i això, no suposa cap perill de trencament ni deformació permanent ja que aquesta es manté per sota del límit elàstic del material.

En la secció lateral del utilatge es pot observar com hi ha un augment de la tensió entorn als forats per on el col·loca el passador. Tanmateix, aquest augment no implica una preocupació pel material ja que les tensions són de valor molt baix i ronden entre els 77 MPa i els 128 MPa. (Figura 49)

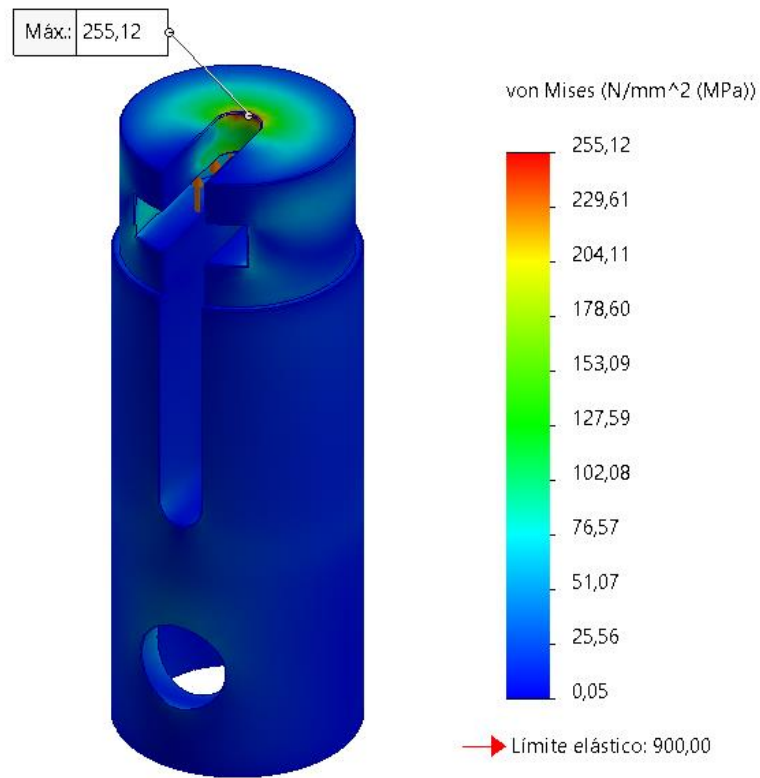


Figura 48. Simulació tensions utilatge en condicions límit

(Font: Elaboració Pròpia)

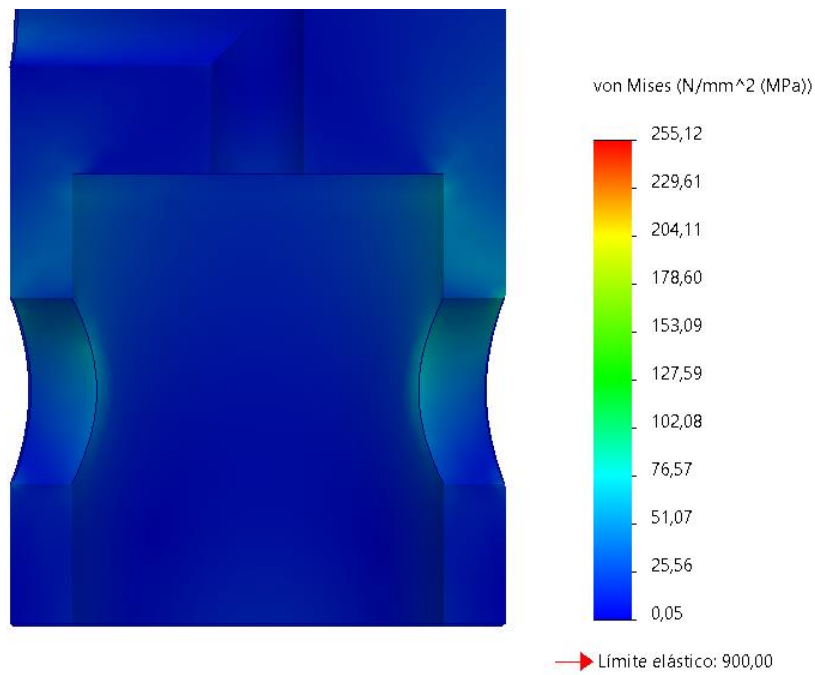


Figura 49. Detall simulació tensions utilatge en condicions límit

(Font: Elaboració Pròpia)

2. Deformacions

Pel que fa a les deformacions en aquest cas trobem un augment respecte l'anterior simulació, encara que presenten la mateixa distribució. Sent aquesta una distribució repartida per la zona de contacte entre la filera i l'utilatge. Tot i aquest augment, el punt amb la deformació més elevada segueix tenint un valor relativament baix i, per tant, no suposa un perill. En la Figura 50 es pot observar com la deformació més elevada no supera els 0,045 mm.

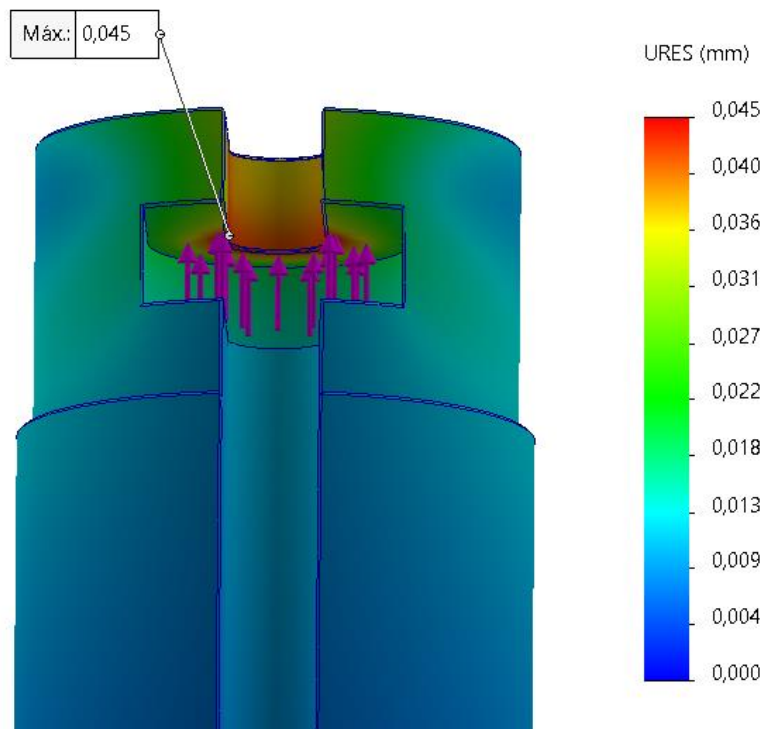


Figura 50. Simulació de deformacions utilatge en condicions límit

(Font: Elaboració Pròpia)

Gràcies a les simulacions s'ha pogut comprovar que tot i treballar en unes condicions molt severes de procés, la integritat del producte no es veu minvada i, per tant, té viabilitat en tot moment.

2.10 FABRICACIÓ DELS ELEMENTS

Per a la fabricació dels components caldrà adreçar-se a un centre de mecanitzat ja que, en aquest cas, tots els components desenvolupats els quals cal fabricar es realitzaran mitjançant aquest procés.

Tant per a l'utilitatge com per a la corona superior la millor opció per a la seva fabricació és el mecanitzat amb un torn. Al ser peces cilíndriques i metàl·liques aquest procés esdevé idoni per a la seva manufactura. A més, tot i ser un procés relativament car, és la opció més assequible ja que només cal fabricar una unitat de cada peça.

Algunes regions de l'utilitatge o columna central no es podran dur a terme amb un torn, és per aquest motiu que caldrà emprar una altra màquina. Aquestes regions són l'allotjament de la filera, el forat del passador i la ranura per on s'introdueix el fil. Per a realitzar aquestes modificacions serà necessari utilitzar una màquina de fresat per control numèric o manual que tingui l'habilitat de poder desplaçar-se en les tres direccions de l'espai.

2.11 ETAPES DEL PROCÉS

Per tal de procedir a realitzar el procés de trefilatge caldrà seguir els següents passos:

1. Preparació del fil

Per tal de poder enfilat l'utillatge cal fer una preparació prèvia del fil. Per a això, caldrà reduir el diàmetre uns mil·límetres per tal que aquest pugui passar a través de la filera. Per a cada pas de reducció de diàmetre caldrà reduir aquest fins a la mateixa mida que la de la filera. D'aquesta forma s'aconsegueix que aquest travessi a l'altra banda de la filera i es pugui assegurar una correcta subjecció. Addicionalment, caldrà aplanar uns mil·límetres l'extrem per tal que aquest pugui ser subjectat per la mordassa superior de la màquina de tracció. Caldrà reduir el diàmetre una longitud d'uns 45 mm per tal que pugui passar a través de la filera, l'utillatge i encara quedi la part que serà aplanada, la qual podrà arribar a ser de fins a 15 mm. A continuació es mostra un esquema que il·lustra tot el material que cal modificar. (Figura 51)

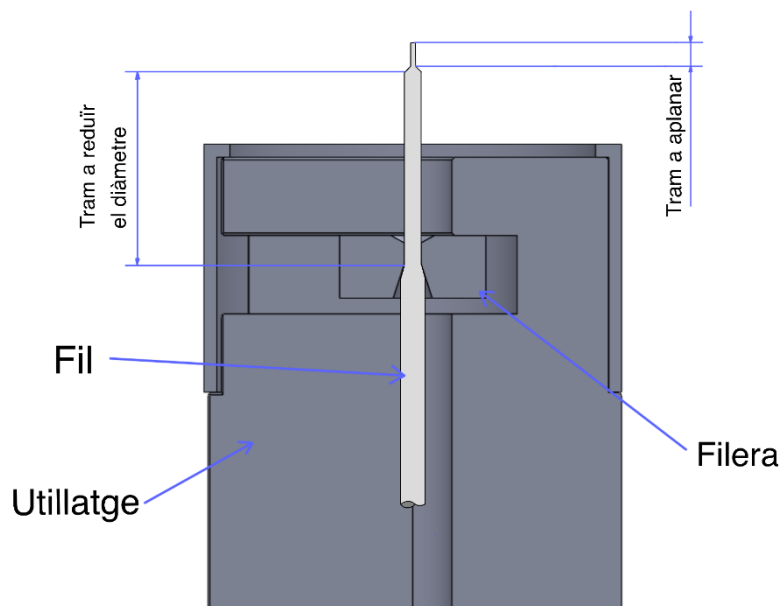


Figura 51. Representació gràfica secció utillatge i trams a modificar del fil

(Font: Elaboració Pròpia)

2. Preparació de l'utillatge i la maquinària

Un cop s'hagi preparat el fil caldrà col·locar l'utillatge en la seva posició. Per això, farà falta introduir-lo en la unió inferior de la màquina de tracció, alinear els forats i col·locar el passador per a assegurar l'utillatge a lloc. (Figura 52)



Figura 52. Representació gràfica unió inferior, utillatge i passador

(Font: Elaboració Pròpia)

3. Procés d'enfilar

Havent preparat el material a trefilar i l'utillatge caldrà enfilar el sistema. Per a això es procedirà a introduir el fil pel forat de la filera procurant que l'angle d'atac d'aquesta quedi en la part inferior i orientat a l'interior de l'utillatge. El fil haurà de travessar el forat intern i passar per la filera, tal i com es pot veure en la Figura 51. Seguidament, caldrà col·locar en el lloc adient la filera desitjada. A continuació, i amb la filera al seu lloc, es procedirà a col·locar la corona superior, la qual assegurarà que la filera no surt de lloc durant el procés i, al seu voltant, s'hi col·locarà la bobina de l'estació d'escalfament.

Tot seguit, caldrà aplicar el lubricant a la cara interna de la filera. L'utillatge ha de quedar muntat de la següent forma. (Figura 53) Finalment, es procedirà a fixar la part plana dins la mordassa superior de la màquina de tracció.



Figura 53. Representació gràfica utillatge muntat sobre unió inferior amb passador col·locat

(Font: Elaboració Pròpia)

4. Escalfament

Un cop tots els passos previs s'hagin realitzat es procedirà, si les condicions del procés així ho requereixen, a l'escalfament de l'utilatge. Per a fer-ho, caldrà encendre el forn d'inducció seguint el procediment de treball adequat. Seguint les directrius d'aquest document s'ajustarà a la temperatura desitjada.

5. Trefilat

A partir d'aquest punt ja es podrà procedir a trefilar el material seguint el procediment de treball adequat de la màquina de tracció Zwick. Ambdós procediments de treball es poden trobar en físic en el laboratori on es troben situades les màquines. En cas contrari, caldrà demanar-los als responsables dels equips.

Finalment, tot hauria de quedar tal i com es pot veure en les figures següents. (Figura 54, Figura 55)

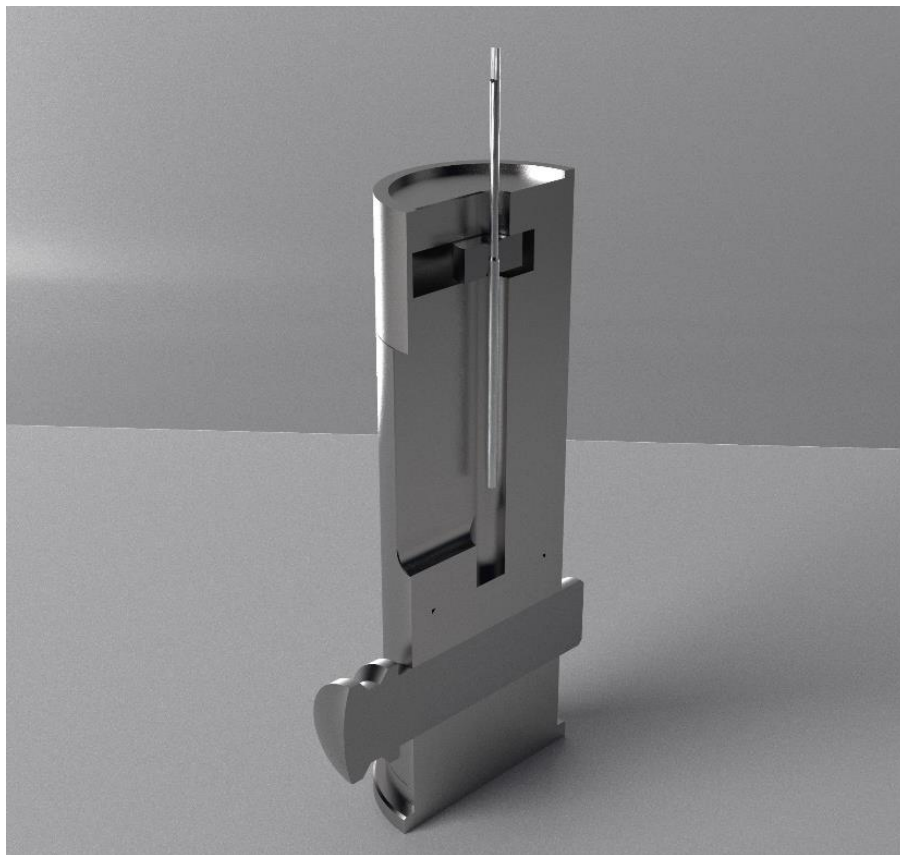


Figura 54. Representació gràfica secció utilatge preparat per al trefilatge

(Font: elaboració Pròpia)

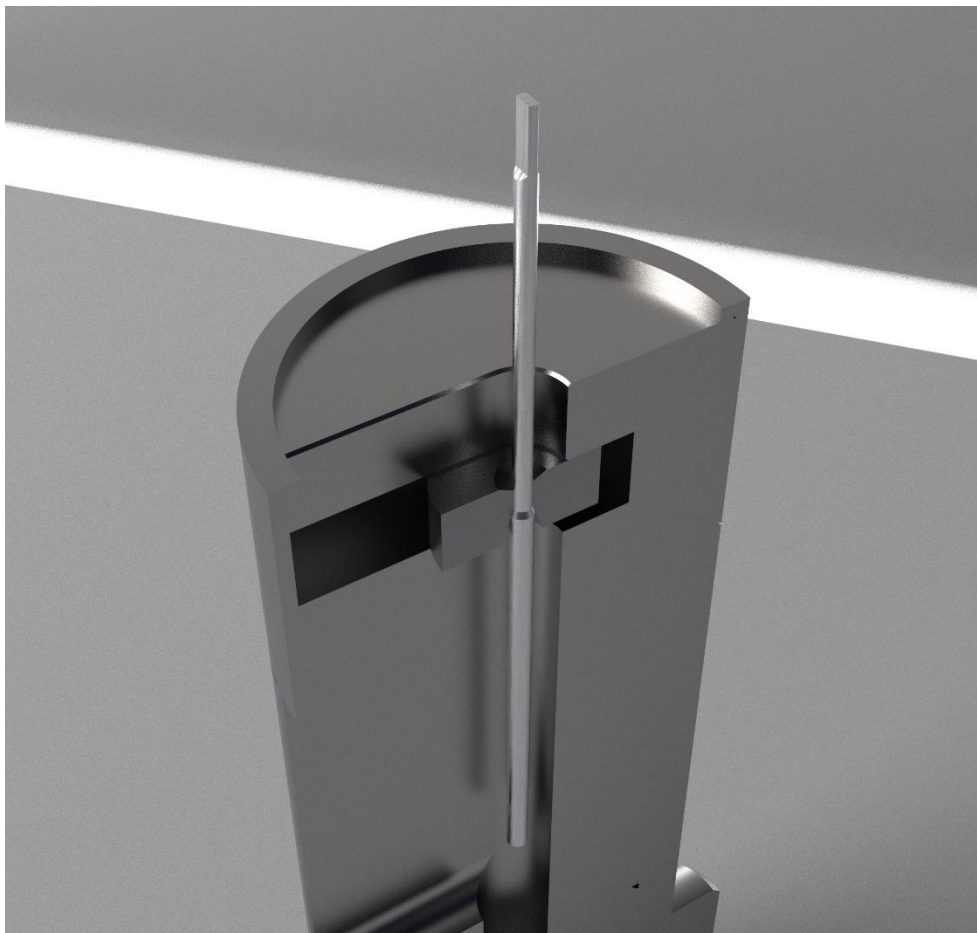


Figura 55. Representació gràfica detall secció utilatge preparat per al trefilatge
(Font: elaboració Pròpia)

2.12 PRESSUPOST

Un cop realitzat el projecte, s'ha desenvolupat un pressupost per a visualitzar els costos que suposaria dur-lo a terme. Aquest pressupost s'ha dividit en 3 parts: els costos d'enginyeria, els costos dels recursos i costos de fabricació.

2.12.1 COSTOS D'ENGINYERIA

Dins aquest apartat es tenen en compte les hores de dedicació destinades a totes i cadascuna de les tasques desenvolupades en aquest projecte. Aquestes tasques, pròpies d'un enginyer, són la formació, el disseny, el càlcul, el modelat, la simulació, el desenvolupament dels plànols i la redacció de l'informe. A continuació es mostra un desglossament de les tasques desenvolupades, les hores de dedicació, el preu hora per a cada tasca i finalment el preu total dels costos d'enginyeria. (Taula 15)

Taula 15. Desglossament costos d'enginyeria

Tasca	Hores	Preu/Hora	Preu	% IVA	Preu IVA	Preu TOTAL
Formació	190	8 €/h	1520	0,21	319,2	1839,2
Disseny	150	17 €/h	2550	0,21	535,5	3085,5
Càlculs	60	17 €/h	1020	0,21	214,2	1234,2
Modelat	30	25 €/h	750	0,21	157,5	907,5
Simulació	50	25 €/h	1250	0,21	262,5	1512,5
Desenvolupament de plànols	10	20 €/h	200	0,21	42	242
Redacció d'informe	100	17 €/h	1700	0,21	357	2057
TOTAL	590	-	8990	-	1887,9	10877,9

En resum els costos d'enginyeria sumen un total de 8990 €.

2.12.2 COSTOS DELS RECURSOS

Pel que fa als recursos, en aquest apartat es farà un desglossament del cost de tot aquell material fungible i tot el material necessari per desenvolupar el projecte. Aquest material inclou tota la matèria prima per a la fabricació dels components, els components comprats, el material d'oficina i llicències de software. (Taula 16, Taula 17)

Taula 16. Cost matèria primera per a fabricar els components

Matèria	Quantitat	Preu/kg	Total
AISI H13	10,58 kg	5 €/kg	52,9 €

Taula 17. Costos material fungible i material per a desenvolupar el projecte

Producte	Quantitat	Cost	Total / €
Filera PCD Esteves Group	3	550 €/u.	1650
Llicència Solidworks	1,33	1500 €/trimestre	2000,0
Ordinador	1	359,99 €/u	359,99
Total	-	-	4009,99

El cost total dels recursos suma un total de 4062,89 €.

2.12.3 COSTOS DE FABRICACIÓ

Finalment els costos de fabricació es basen en el tornejat i fresat dels components. No es té en compte l'assemblatge dels productes ja que aquest pas es durà a terme en el propi laboratori quan s'iniciï el procés. En la Taula 18 es pot veure el desglossament del cost del mecanitzat. Cal destacar que el preu hora de fabricació inclou la mà d'obra, el lloguer de la maquinària i l'IVA.

Taula 18. Costos de fabricació dels components

Component	Hores de mecanitzat	Preu/Hora	Total / €
Estructura Principal	3	31,5	94,5
Corona superior	1,5	31,5	47,25
Total	4,5	-	141,75

El cost total de fabricació és de 141,75€.

La suma dels tres costos dona com a resultat el cost total del projecte. Fóra bo comentar que no s'han tingut en compte els costos de servei i de manteniment de la maquinària utilitzada en el procés ja que són externs al projecte. El preu final es pot trobar en la Taula 19 juntament amb els impostos.

Taula 19. Desglossament costos i preus totals del projecte

Concepte	Preu	% IVA	Preu IVA	Preu amb IVA TOTAL
Costos d'enginyeria	8990	0,21	1887,9	10877,9
Costos dels recursos	4062,89	0,21	inclòs	4062,89
Costos de fabricació	141,75	0,21	inclòs	141,75
TOTAL	13194,64	-	1887,90	15082,54

Per tant, el preu final de tot el projecte amb impostos suma un total de 15082,54€.

CONCLUSIONS

Aquest projecte ha permès desenvolupar un estudi teòric entorn els processos de deformació plàstica, s'ha aprofundit en el procés de trefilat i s'han estudiat quins són els mètodes més implementats per a la impressió 3D de metalls. Tot aquest coneixement ha pogut ser aplicat al desenvolupament de l'equip de trefilat versàtil que permeti treballar en fred i en calent.

Els coneixements assolits han permès dur a terme l'estudi i l'assentament d'una base teòrica al voltant del procés de trefilat, el que ha permès el disseny d'aquells elements que han estat necessaris per a poder aconseguir el disseny d'un utilatge per al trefilat de filament d'alumini.

Ha estat possible dissenyar un procés que involucra un canvi en el paradigma del trefilat, innovant en el camp del trefilatge.

S'ha determinat que els factors que influeixen més el procés són la temperatura de treball, la geometria de la filera i la lubricació.

Tal com s'ha demostrat de forma teòrica la temperatura és el factor que més influeix en l'esforç necessari per tal de deformar el material. Disminuint aquesta a mesura que augmenta la temperatura.

En factors com la geometria de la filera i la seva lubricació també s'ha pogut observar com el canvi de geometria o l'absència d'un lubricant implicarien un augment de la tensió requerida. D'altres factors, com la velocitat de trefilatge, s'ha observat com no suposen un augment de la tensió de trefilat.

S'ha dissenyat un utilatge adaptable a una màquina de tracció la qual serà l'encarregada d'aplicar els esforços necessaris per a trefilar el material.

El mòdul SOLIDWORKS Simulation del programari de disseny ha permès realitzar simulacions per a la validació dels càlculs mecànics de l'equip de trefilat en calent.

Per al disseny dels components s'ha procurat situar-se en el pitjor dels casos i treballar en les condicions límit establertes. El disseny assolit és el d'uns utilatges versàtils i adients per a poder complir l'objectiu principal. Aquests components s'han optimitzat per

Disseny i validació d'un equip de trefilat en calent de fil d'alumini per a impressió 3D
Enric Guisado Corcoll

a produir el filament desitjat tot i que s'ha implementat versatilitat en el producte per tal de trefilar altres productes en un futur si es desitja.

S'ha plantejat un disseny de tres passos on es redueix el diàmetre d'un fil de 3,2 mm fins a obtenir un producte de 1,75 mm. El primer pas redueix dels 3,2 mm de diàmetre fins als 2,62 mm. El següent dels 2,62 mm fins als 2,14 i, finalment, l'últim pas ho redueix fins als 1,75 mm. En tots i cadascun dels passos, el percentatge de reducció de secció es manté igual, sent aquest un 33%.

El disseny permet fer trefilats en un rang de temperatures entre 25°C i 405°C distribuïdes en tres intervals de treball: en fred (25 – 173°C), en tebi (173 – 289°C) i en calent (289 – 405°C).

AGRAÏMENTS

Aquest treball final d'estudis, al llarg de la seva realització, ha anat plantejant diversos problemes. Tot i això, gràcies a l'esforç, la dedicació, la perseverança i l'ambició de tirar endavant un projecte d'aquestes característiques, s'han pogut solucionar tots i cadascun d'ells i, a més, han suposat un aprenentatge per mi.

Abans de res m'agradaria agrair la indubtable ajuda proporcionada per en Sergi, el director d'aquest projecte, el qual en cas de dubte sempre ha proporcionat els recursos necessaris per a resoldre'ls.

En segon lloc, m'agradaria agrair als membres del CDAL, en concret a la Maite, l'Enric, en Josep i en Sergi, la seva implicació en transmetre'm tot el coneixement possible en l'àmbit de la ciència i l'enginyeria dels materials. Aquest coneixement ha pogut ser aplicat, en alguns casos, en aquest projecte.

Agrair també l'amabilitat de l'empresa Esteves Group per la seva predisposició a l'hora de respondre a totes aquelles qüestions plantejades i pel seu assessorament entorn al procés de trefilat.

Finalment, però no per això menys important, agrair a la meva família, als meus amics i a la meva parella el suport rebut en tot moment.

BIBLIOGRAFIA

- (Aboulkhair, 2019) Aboulkhair, N. T., Simonelli, M., Parry, L., Ashcroft, I., Tuck, C., & Hague, R. (2019). 3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting. *Progress in materials science*, 106, 100578.
- (Askeland, 2017) Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage learning.
- (Callister, 2020) Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverte. N.º 1 edición
- (Córdova, 2011) Córdova, W., & Guatemala, M. D. (2011). Elaboración de un manual de procedimientos operativos, para la estandarización del proceso de trefilación de alambre, en la industria metal mecánica.
- (Cuascota, 2021) Cuascota Ulcuango, J. L., & Toapanta Maldonado, J. L. (2021). Diseño y construcción de una trefiladora manual para el laboratorio de conformado mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica (EPN).
- (El-Domiaty, 1998) El-Domiaty, A., & Kassab, S. Z. (1998). *Temperature rise in wire-drawing*. *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3), 72-83.
- (Fafenrot, 2017) Fafenrot, S., Grimmelsmann, N., Wortmann, M., & Ehrmann, A. (2017). Three-dimensional (3D) printing of polymer-metal hybrid materials by fused deposition modeling. *Materials*, 10(10), 1199.
- (Forn, 2010) Forn, A., Vaneetveld, G., Pierret, J. C., Menargues, S., Baile, M. T., Campillo, M., & Rassili, A. (2010). Thixoextrusion of A357 aluminium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, s1005-s1009.

- (Fresno, 2007) Fresno, D. (2007). Optimización de los Tratamientos Térmicos T5 y T6 para una Aleación A356 Conformada por SLC. Treball final de grau. Universitat Politècnica de Catalunya.
- (Garenne-Marot, 2019) Garenne-Marot, L. (2019). Proceso de trefilado en la antigua Katanga, República del Congo: la riqueza de los fondos arqueológicos, etnográficos y de archivo del Museo Real de África Central en Tervuren, Bélgica. *Nerter*, 30-31.
- (Geetha, 2014) Geetha, B., & Ganesan, K. (2014). Optimization of tensile characteristics of Al 356 alloy reinforced with volume fraction of red mud metal matrix composite. *Procedia Engineering*, 97, 614-624.
- (Gibson, 2021) Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17). Cham, Switzerland: Springer.
- (Haddi, 2011) Haddi, A., Imad, A., & Vega, G. (2011). *Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process*. *Materials & Design*, 32(8-9), 4310-4315.
- (Kalpakjian, 2008) Kalpakjian, S., Schmid, S.R. y Kok, C.-W. (2008). *Manufacturing processes for engineering materials. 5th ed. in SI units*. Singapore. Pearson Prentice Hall.
- (Kapustová, 2012) Kapustová, M., & Martinkovic, M. (2012). *Influence of temperature on plasticity and workability of aluminium alloys*. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 10(2), 223.
- (Leal, 2015) Leal, S. (2015). *E-Renovarse o morir*. Editorial Almuzara.
- (Martín, 2021) Martín, E. (2021). 4.1 y 4.2 Procesos de conformación deformación plástica. [1-67]. Departament de Ciència i Enginyeria de Materials, Universitat Politècnica de Catalunya.
- (Maudos, 2021) Maudos, N. (2021). Disseny d'una matriu per a thixoextrusió 3D

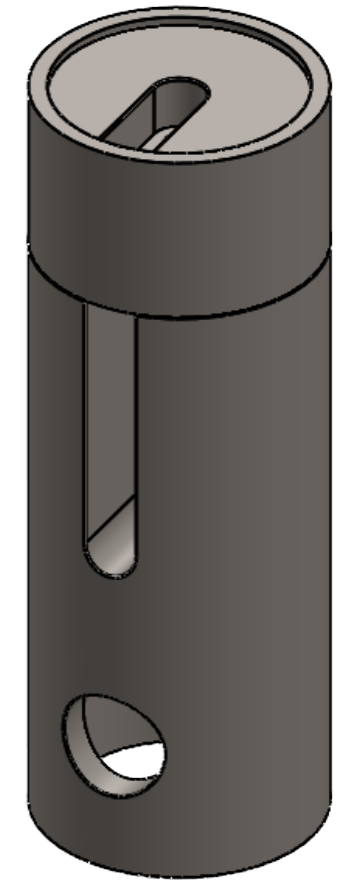
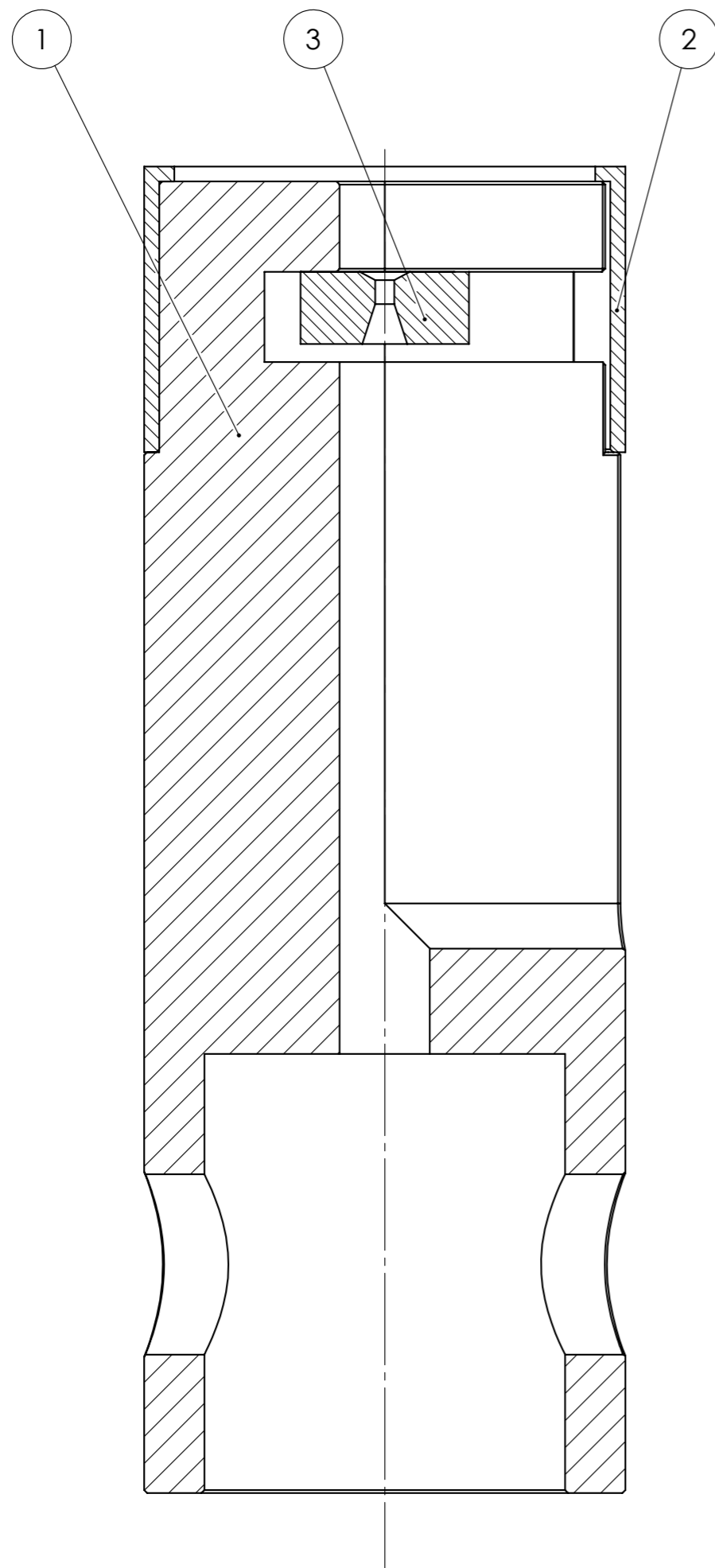
d'aliatges d'alumini. Treball final de grau. Universitat Politècnica de Catalunya.

- (Menargues, 2011) Menargues, S. (2011). Optimización de componentes de aluminio obtenidos por Sub-Liquidus Casting. Tesis Doctoral, UPC.
- (Misiolek, 2005) Misiolek, W.Z., Kelly, R.M. (2005). *Extrusion of Aluminum Alloys. ASM Handbook, Vol 14A*. ASM International: Materials Park, OH, USA.
- (Pops, 2018) POPS, H. [WireAssociationIntl] (26 de Setembre de 2018). *The History of Wire Drawing* [Arxiu de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=hmJ1Fsj-Zts&t=1s>
- (Porta, 2010) Porta, J.R. (2010). Màquina trefiladora per a petites produccions a nivell de laboratori. Treball final de grau. Universitat Politècnica de Catalunya.
- (Rodríguez, 2017) Rodríguez Alabanda, O. (2017). Metodología para el estudio y diseño tecnológico del proceso secuencial de estirado multi-etapa de alambre y barras de sección circular. Tesis Doctoral, Universidad de Málaga.
- (Schey, 2002) Schey, J. A., & León Cárdenas, J. (2002). *Procesos de manufactura*. Tercera edición. University of Waterloo, Ontario. McGrawHill.
- (Sisa, 2012) Aceros SISA Servicios Industriales [en línia]. Acero SISA H13, 2012
[Consulta: 12/04/2021]
- (Tekmen, 2005) Tekmen, C., Toparli, M., Ozdemir, I., Kusoglu, I. M., & Onel, K. (2022). High temperature behaviour of H13 steel. *International Journal of Materials Research*, 96(12), 1431-1433.

(Tschaetsch, 2006) Tschaetsch, H. (2006). *Metal forming practise: processes—machines—tools*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

(Urrutiko, 2016) Urrutiko Lanbide Heziketa Institutua. (2016). 1.4.5 - Máquinas de estirado y trefilado. Ikastaroak.



ANNEX I: PLÀNOLS

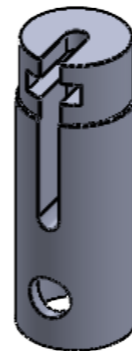
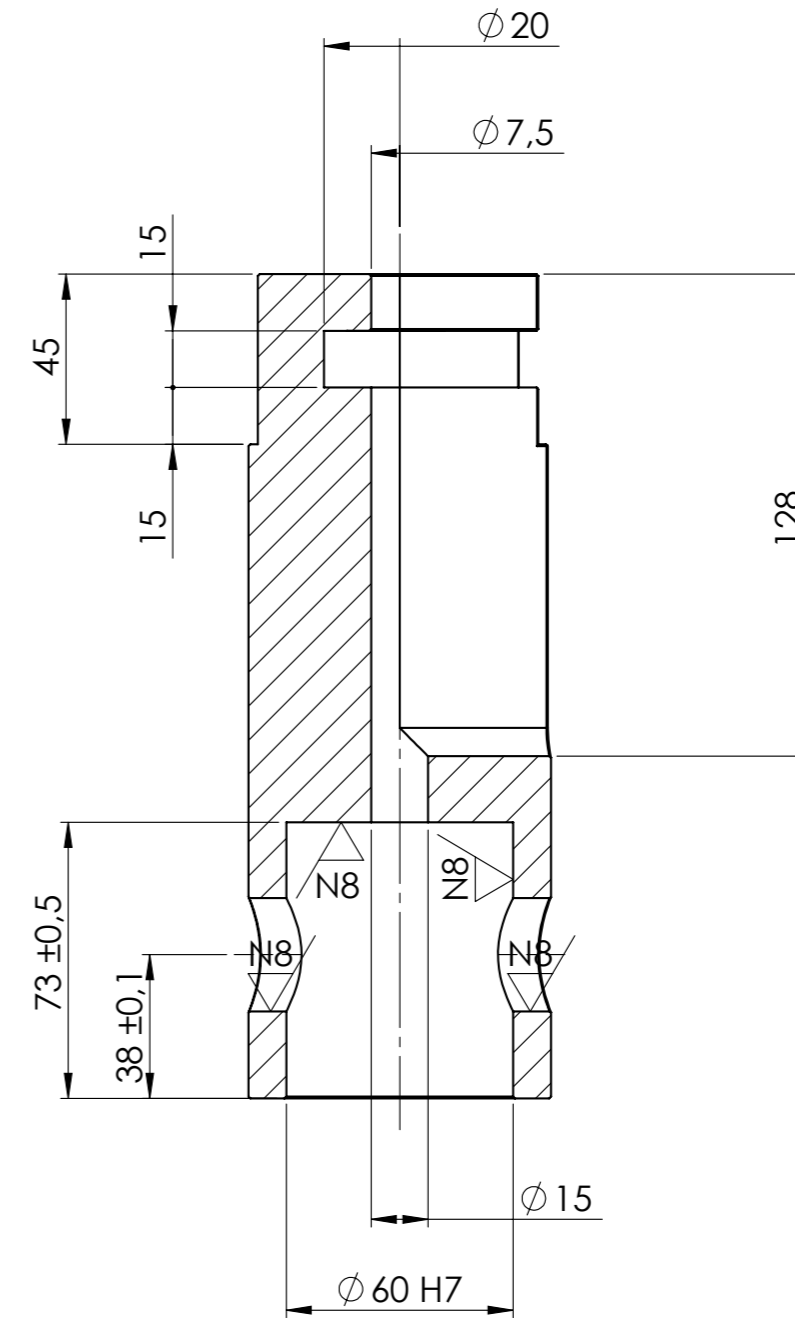
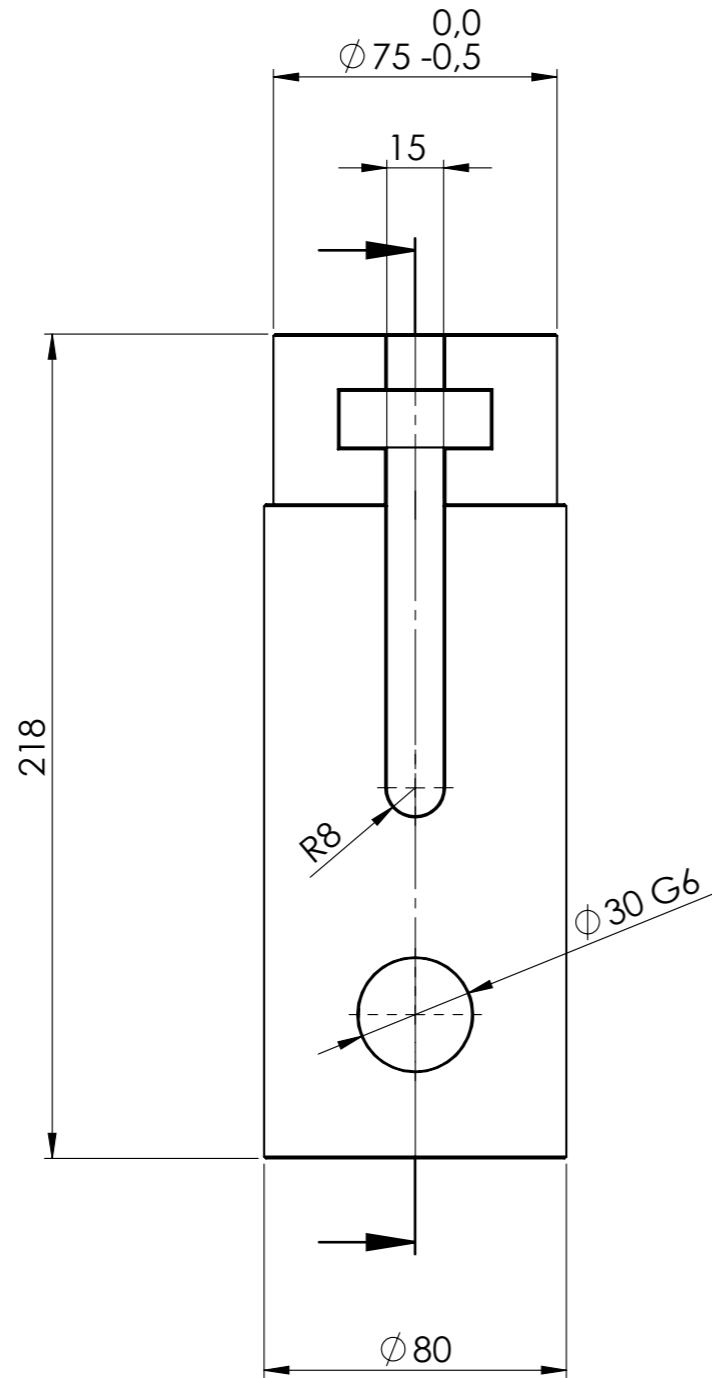


N.º D'ELEMENT	PEÇA	DESCRIPCIÓ	QTT.
1	1.1 - Estructura Principal	AISI H13	1
2	1.2 - CoronaSuperior	AISI H13	1
3	1.3 - Filera	Filera PCD Esteves Group	1




TFE	Data	Cognoms, Nom
Dibuixat	14/06/23	Guisado Corcoll, Enric
Professor	14/06/23	Menargues Muñoz, Sergi
Norma		

Projecció	<h1>1 - Utiltatge de Trefilat</h1>	Especialitat	Disseny Industrial
Escala		Projecte	Equip de trefilat en calent
1:1		Revisió	
		Material	

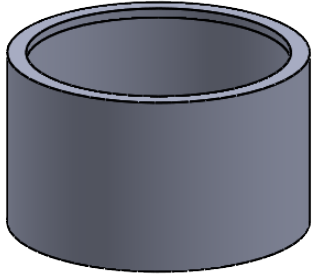
	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE GATALUNYA BARCELONATECH <small>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</small>	
---	--	---



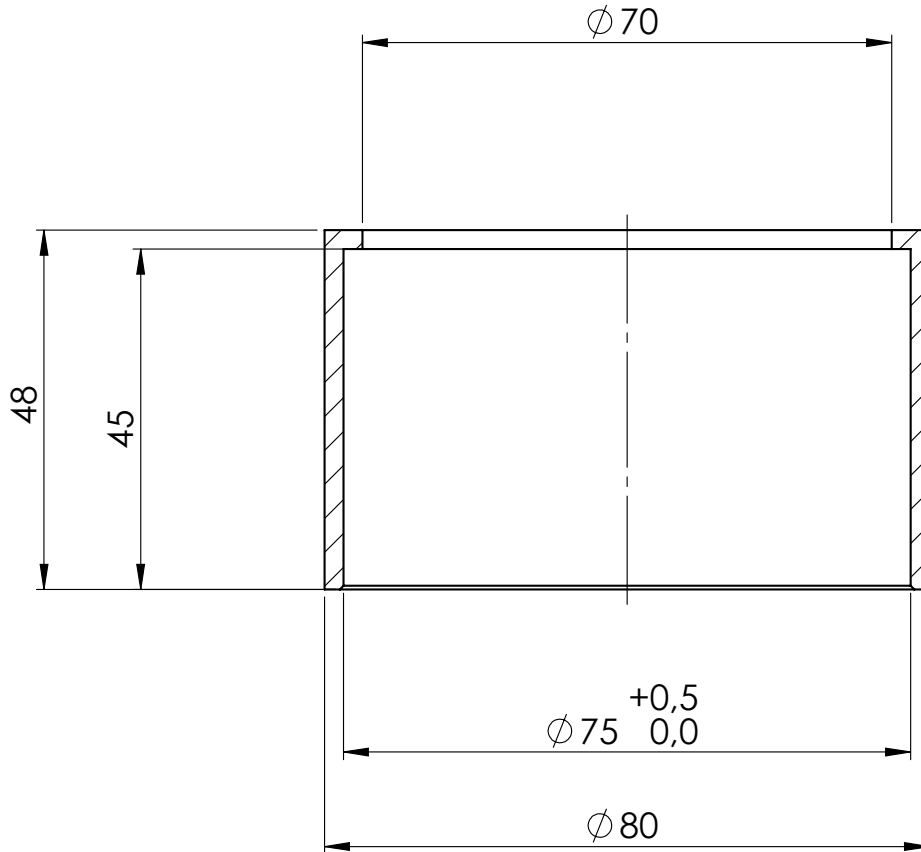
- Notes:
- Xamfrans No Acotats 0,5 x 45°
 - Tol. Gral. S/N ISO-2768-mK
 - Matar cantells vius amb Xamfrà 0,2 x 45°

TFE	Data	Cognoms, Nom		
Dibuixat	14/06/23	Guisado Corcoll, Enric	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE GATALUNYA BARCELONATECH <small>Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú</small>	
Professor	14/06/23	Menargues Muñoz, Sergi		
Norma				
Projecció			Especialitat	Disseny Industrial
Escala	1:2		Projecte	Equip de trefilat en calent
			Revisió	
			Material	AISI H13

1.1 - Estructura Principal



N10
▽



Notes:

- Xamfrans No Acotats 0,5 x 45°
- Tol. Gral. S/N ISO-2768-mK
- Matar cantells vius amb Xamfrà 0,2 x 45°

TFE	Data	Cognoms, Nom	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Milanova i la Geltrú	
Dibuixat	14/06/22	Guisado Corcoll, Enric		
Professor	14/06/22	Menargues Muñoz, Sergi		
Norma				
Projecció 	<h2>1.2 - Corona Superior</h2>		Especialitat	Disseny Industrial
Escala 1:1			Projecte	Equip de trefilat en calent
			Revisió	
			Material	AISI H13