



EPS

Escola Politècnica

Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Tècn. Ind. Mecànica. Pla 2002

Títol: DISSENY I IMPLEMENTACIÓ D'UN SISTEMA PER A LA SIMULACIÓ DE PROCESSOS D'ARRANC DE FERRITJA

Document: MEMÒRIA

Alumne: Jordi Martí Bahi

Director/Tutor: Quim de Ciurana

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria dels Processos de Fabricació

Convocatòria (mes/any): juny/2007

INDEX

1. INTRODUCCIÓ	3
1.1. Antecedents	3
1.2. Objecte	4
1.3. Especificacions i abast	4
2. ALGORISME DELS STEPS DE G. HALLEVI I R.D. WEILL	5
2.1. Restriccions tècniques	5
2.1.1. Restriccions tecnològiques	5
2.1.2. Restriccions de la màquina	6
2.1.3. Restriccions de l'eina	7
2.1.4. Altres restriccions	7
2.1.5. Resum de les restriccions	8
2.2. Anàlisi dels paràmetres de tall en front les restriccions de la peça	9
2.2.1. Efecte de la velocitat de tall sobre la rugositat superficial	9
2.2.2. Efecte de la velocitat d'avanç sobre la rugositat superficial	10
2.2.3. Efecte de la profunditat de passada sobre la rugositat superficial	13
2.3. Restriccions operacionals i dependents	14
2.3.1. Profunditat de passada en funció de la velocitat d'avanç	14
2.3.2. Profunditat de passada en funció de l'operació escollida	16
3. RESTRICCIONS I PARÀMETRES	17
3.1. Introducció	17
3.2. Restriccions tècniques i econòmiques	17
3.3. Paràmetres de tall	18
3.3.1. Velocitat de tall	18
3.3.2. Velocitat d'avanç	19
3.3.3. Profunditat de passada	20
3.3.4. Restriccions operacionals i dependents	21
3.3.4.1. Profunditat de passada en funció de la velocitat d'avanç	21
3.3.4.2. Profunditat de passada en funció de l'operació escollida	23
4. ALGORISMES DE LES OPERACIONS DE REFRENTAT I RANURAT	24
4.1. Introducció a l'operació de refrentat	24
4.2. Plantejament del refrentat	24

4.3. Introducció a l'operació de ranurat	26
4.4. Plantejament del ranurat	27
4.5. Anàlisi dels passos de l'algorisme per a les dues operacions	27
4.5.1. Pas 1	27
4.5.2. Pas 2	29
4.5.3. Pas 3	29
4.5.4. Pas 4	30
4.5.5. Pas 5	30
4.5.6. Pas 6	30
4.5.7. Pas 7	31
4.5.8. Pas 8	31
4.5.9. Pas 9	31
4.5.10. Pas 10	31
4.5.11. Pas 11	32
4.5.12. Pas 12	32
4.5.13. Pas 13	33
4.6. Diagrama de flux de l'operació de refrentat	34
4.7. Diagrama de flux de l'operació de ranurat	35
4.8. Interpretació de l'aplicació informàtica de l'operació de refrentat	36
4.9. Interpretació de l'aplicació informàtica de l'operació de ranurat	39
5. RESUM DEL PRESSUPOST	42
6. CONCLUSIONS	42
7. RELACIÓ DE DOCUMENTS	43
8. BIBLIOGRAFIA	43
9. GLOSSARI	44

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

El procés de planificació serveix per determinar la fabricació d'un producte i evidència, si existeix, quin és l'element clau d'aquest procés. Té un paper important en la determinació dels costos dels components i efectes de tota la producció, en la competitivitat empresarial, en el procés i eficiència de producció, i, en la qualitat del producte. És el vincle indispensable entre el disseny i la producció.

La necessitat d'unificar i millorar la capacitat del procés comprès pel disseny, integració i optimització dels sistemes i processos de fabricació ha conduït a la creació de *software* destinat a la millora de capacitat d'aquests. Aquestes aplicacions ens permeten adequar-nos a la situació de cada taller/fàbrica.

En bona part de les grans empreses és present la idea d'integració de la producció CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) que aporta multitud d'avantatges i beneficis. El punt de partida del present projecte són les tasques de l'anell central d'aquest mateix sistema.

El punt d'unió entre les tasques mencionades de disseny i fabricació del producte i la planificació de la producció és l'objectiu del CAPP (*Computer Aided Process Planning*). L'objectiu del CAPP no és altre que fer un tractament de forma conjunta de factors com per exemple el desgast de les eines, disponibilitat d'eines i/o maquinaria, velocitat de tall i/o d'avanç, temps de preparació, etc, i d'aquesta manera enllaçar tots els factors de les operacions d'arrencament de ferritja.

En l'actualitat, hi ha un important nombre d'estudis i programes que permeten el tractament de les activitats ja esmentades. Però G. Halevi i R. D. Weill en "*Principles of process planning. A logical approach*" (1985) proposen un tractament global de totes aquestes activitats; una àrea en la que sí existeixen grans mancances. En el seu treball, realitzen un estudi important sobre l'obtenció de la velocitat d'avanç, la velocitat de tall i la profunditat de passada de manera conjunta, tenint en compte tots els factors i restriccions que exerceixen alguna influència sobre el procés de mecanitzat. El seu treball, marca les pautes de desenvolupament d'aquest projecte, en el que he adaptat i modificat els paràmetres per adequar-los a les operacions de refrentat i ranurat.

El que s'intenta és realitzar de forma conjunta el sistema de planificació assistit, el tractament dels paràmetres de tall i les seves variables (desgast, disponibilitat...) per a obtenir, en tot moment, la solució més adequada. L'aplicació desenvolupada en aquest projecte no pretén ser un CAPP; l'objectiu d'aquest projecte és més discret. La meua pretensió ha estat l'obtenció dels paràmetres d'avanç i profunditat de passada adients per a les operacions de refrentat i ranurat, en funció d'uns paràmetres i restriccions combinats.

Aquesta aplicació, formarà part d'un programa de dimensions majors, que oferirà el càlcul (amb els mateixos criteris) de totes les operacions d'arranc de ferritja. D'aquesta manera, les presents operacions de refrentat i ranurat, complementen dos projectes ja desenvolupats. El primer en què es calculen les operacions de cilindrada (torn) i planejat (fresa), i el segon, que introdueix el taladrat amb torn, taladrat amb fresa i taladrat amb taladradora. Així doncs, resta obert per a continuar complementant un projecte molt més ambiciós.

1.2. Objecte

L'objecte del següent projecte és el de crear una interfície capaç d'obtenir paràmetres dels processos de refrentat i ranurat, tals com l'avanç, la profunditat de passada i el número de passades en funció de la rugositat superficial i tenint en compte tant els diferents factors i restriccions entrats per l'usuari com els que van ser estudiats, al seu moment, per als autors G. Halevi i R.D. Weill.

1.3. Especificacions i abast

Les especificacions del present projecte són les següents:

- Obtenció d'un algorisme per al procés de refrentat diferenciant-ne les operacions de desbast i d'acabat en les condicions de tall més ajustades possibles, donant com a resultat la velocitat d'avanç, la profunditat de passada i el número de passades.
- Obtenció d'un segon algorisme per al procés de ranurat per a una ranura simple, sempre contemplant les condicions de tall òptimes i donant com a resultat la velocitat d'avanç i el número de passades.
- Crear una aplicació informàtica que sigui senzilla amb un moviment entre les diferents interfícies intuïtives i que no pugui donar confusions a l'usuari a l'hora de treballar-hi. Tenir en compte possibles errades de l'usuari a l'hora d'entrar-hi les dades inicials i de

possibles incongruències i que alhora tot això es reflecteixi en missatges d'error on s'especifiquin a l'usuari possibles errors i guiar-lo per a poder-ho solucionar.

- Sotmetre l'algorisme a l' introducció de dades, tant reals com fictícies, per a comprovar així l'eficàcia de l'algorisme i la seva funcionalitat.

L'abast d'aquest projecte és la creació d'una aplicació informàtica basant-se en els estudis realitzats per als autors G. Halvei i R.D. Weill amb una corresponent adaptació als processos de refrentat i ranurat.

2. ALGORISME DELS STEPS DE G. HALLEVI I R.D. WEILL

En aquest capítol s'explicarà el mètode que aquests autors van desenvolupar, amb la finalitat d'aconseguir una adaptació en els processos de refrentat i ranurat en el torn.

2.1. Restriccions tècniques

Cal esmentar que un cop obtinguts els resultats d'aquest algorisme, aquests seran els òptims només quan l'eina i l'operació sigui l'adequada, perquè malgrat paràmetres com la velocitat d'avanç i de tall, i, la profunditat de passada siguin els òptims, si l'eina i l'operació no és l'adequada es perdrà eficàcia i s'augmentarà el cost del procés que es vol realitzar.

Per a determinar els paràmetres òptims més amunt esmentats, els dos autors citats, en primer lloc van imposar unes restriccions tècniques que veurem a continuació:

- Restriccions tecnològiques
- Restriccions de la màquina
- Restriccions de l'eina
- Altres restriccions (Peça, material, usuari)

2.1.1. Restriccions tecnològiques

A partir dels nombrosos estudis existents sobre la teoria de tall, es coneix l'existència de valors mínims i màxims de la velocitat d'avanç, de la velocitat de tall i de la profunditat de passada. Anem a definir cadascun d'aquests paràmetres:

Velocitat d'avanç: si es treballa amb velocitats molt baixes, reduïm l'arranc de ferritja generant l'adhesió de partícules procedents del mecanitzat sobre la cara de tall, provocant uns acabats superficials dolents, un augment de les vibracions i un desgast de l'eina molt major; aquest fenomen s'anomena BUE (Built up edge). Pel contrari, si superem determinades velocitats, l'efecte és la craterització per a la qual, malgrat no hi ha realitzats estudis acurats, però podem assegurar un envelliment prematur de l'eina. Degut a aquests efectes haurem de considerar una velocitat d'avanç mínima i una de màxima: f_{tmin} , f_{tmax} .

Profunditat de passada: per a cada tipus de material existeixen uns determinats valors mínims que si no els respectem, no es genera ferritja en el procés sinó que es deforma la peça que s'està mecanitzant amb la possible conseqüència de provocar una ruptura d'aquesta. Per evitar aquests efectes s'haurà de considerar una profunditat de passada mínima i una de màxima: a_{tmin} , a_{tmax} .

2.1.2. Restriccions de la màquina

En tot procés d'arranc de ferritja, apareix un factor molt important que afecta a l'acabat superficial i dimensional que són les vibracions. Aquest factor pot ser molt perjudicial ja que pot convertir la superfície d'una peça que hauria de ser cilíndrica en ondulada. L'origen d'aquestes vibracions passa per la inestabilitat de la màquina i l'eina degut a les forces de tall que generen flexions radials i tangencials.

Gràcies a diversos estudis duts a terme per investigadors i en les pròpies indústries, s'ha conclòs que encara que les profunditats de passada siguin molt baixes s'origina inestabilitat degut a les forces de fricció entre l'eina i el material. Aquest fet fa que per a vibracions de petita amplitud l'eina es separi del material, el que provoca que es vagi incrementant l'amplitud i aparegui inestabilitat.

Els motius abans exposats han fet que alguns autors prenguin com a límit inferior per a la profunditat de passada a_{vmin} (0,15 mm). Però tot i això, com que no sabem si la seva superfície del material que partim és perfectament cilíndrica és convenient l'ús d'un factor de seguretat.

Per altre banda, estudis realitzats han comprovat que a partir d'un determinat valor de la profunditat de passada les vibracions augmenten considerablement depenent de la rigidesa de cada màquina, de l'eina i del material de partida, i això ens obliga a fixar un límit superior per a la profunditat de passada a_{vmax} (7mm).

Alguns experiments han demostrat que les vibracions augmenten quan es treballa a velocitats d'avanç baixes. Es pren com a límit inferior per a la velocitat d'avanç f_{vmin} 0,04 mm per revolució.

Finalment, s'ha de considerar l'aparició d'inestabilitat dinàmica deguda als canvis de les forces de tall, això fa que limiti la velocitat de tall màxima v_{vmax} depenent sempre de la profunditat de passada.

2.1.3. Restriccions de l'eina

Dins aquestes restriccions cal distingir dos grups: restriccions en quan a l'envelliment i restriccions en quan a la geometria.

Pel que fa a l'envelliment, els estudis realitzats han demostrat que el paràmetre que controla la vida de l'eina no és el desgast i, a més s'ha confirmat que, per a velocitats altes existeix deformació plàstica de la cara de tall i oxidació a la cara secundària, i en conseqüència, la velocitat d'avanç màxima és funció de la velocitat de tall.

La recomanació més habitual és la de utilitzar una velocitat d'avanç màxima d'entre 0,5 i 0,8 mm per revolució. (Treballant a una velocitat de tall de 150 m per minut), no considerant la possibilitat de treballar amb condicions com les que s'utilitzen en el Mecanitzat d'Alta Velocitat (High Speed Machining (HSM)).

Pel que fa a la geometria, cal mencionar que les eines tenen dimensions que limiten la profunditat de passada. Aquesta dimensió passa a ser restricció quan no es pot obtenir una eina amb una dimensió que permeti una profunditat de passada més gran.

Els paràmetres que tindran un paper depenent de la tipologia de l'eina són els següents: profunditat de passada màxima a_{kmax} , velocitat d'avanç màxima f_{kmax} .

2.1.4. Altres restriccions

Dins aquest apartat hi englobem tres tipus de restriccions diferents, les restriccions de la peça, les restriccions del material i les restriccions de l'usuari. Les restriccions de la peça fan referència a aspectes com poden ser toleràncies dimensionals, geomètriques i la rugositat superficial que, per l'experiència es sap que, per sobre de determinades

profunditats de passada o d'avanços, el control tant dimensional com d'acabat superficial fa que el mecanitzat no sigui factible.

Les restriccions del material, tenen en compte diferents materials que, per a les seves característiques, uns són més aptes que els altres per al mecanitzat. També es tenen en compte les propietats que poden facilitar el mecanitzat com són la duresa, la capacitat de difusió del calor, la resistència a la penetració, la forma de la ferritja al tallar-lo, etc.

Per últim, les restriccions de l'usuari, en les que bàsicament el que es té en compte és el factor humà. Aquest juga un paper molt important en els processos de fabricació, podent introduir uns paràmetres fruit de l'experiència que ajudaran a tenir una visió més subjectiva de cada operació. Això ens permetrà ajustar-nos més a la realitat.

Per a totes aquestes restriccions, a vegades difícils d'obtenir, es poden extreure uns límits inferiors i superiors tant per la velocitat d'avanç (f_{umin} , f_{umax}), com per la profunditat de passada (a_{umax} , a_{umin}).

Com que en aquest apartat englobem tres restriccions de tipologia diferent, s'entén que si hi ha més d'un valor per a un mateix paràmetre, s'agafarà el valor més desfavorable.

2.1.5. Resum de les restriccions

Per tal de tenir en compte totes les restriccions esmentades, s'ha realitzat la següent taula:

RESTRICCIONS		Tecnològiques	Màquina	Eina	Altres
PARÀMETRES					
Profunditat de passada	a_{max}	a_{tmax}	a_{vmax}	a_{kmax}	a_{umax}
	a_{min}	a_{tmin}	a_{vmin}		a_{umin}
Velocitat d'avanç	f_{max}	f_{tmax}		f_{kmax}	f_{umax}
	f_{min}	f_{tmin}	f_{vmin}		f_{umin}

Taula 1. Resum de les restriccions tècniques.

A partir del quadre realitzat, podem realitzar-ne un segon per obtenir les cotes inferiors i superiors globals de la profunditat de passada, la velocitat d'avanç i de la velocitat de tall:

RESTRICCIÓ	PROCEDÈNCIA
a_{amax}	Mínim de (a_{tmax} a_{vmax} a_{kmax} a_{umax})
a_{amin}	Màxim de (a_{tmin} a_{vmin})
f_{amax}	Mínim de (f_{tmax} f_{kmax} f_{umax})
f_{amin}	Màxim de (f_{tmin} f_{vmin})

Taula 2. Cotes inferiors i superiors globals de la profunditat de passada, la velocitat d'avanç i la velocitat de tall.

2.2. Anàlisis dels paràmetres de tall en front les restriccions de la peça

Al llarg del capítol 2.1 s'han descrit les diferents restriccions que influeixen en el procés de mecanitzat. A part d'aquestes restriccions ja descrites el mecanitzat també depèn d'altres paràmetres de tall i, alhora, aquests en depenen d'altres. En aquest capítol es descriuran tots aquests paràmetres.

2.2.1. Efecte de la velocitat de tall sobre la rugositat superficial

Una de les causes que afecta directament a la rugositat superficial és el comportament de la cara de tall principal. Pel fenomen BUE (descrit al capítol 2.1.1.), les partícules soldades sobre la cara de tall erosionen la superfície de la peça. Llavors, si a aquest efecte s'augmenta la velocitat, l'eina augmenta de temperatura i el material adherit a l'eina es desprèn.

Aquest procés de moviment de material provoca un augment de la velocitat de desgast de l'eina. L'impacte del material procedent de l'efecte BUE contra la peça genera vibracions que empitjora l'acabat de la peça pel que fa a la rugositat superficial.

Degut a, per una banda, la gran dificultat que hi ha per a quantificar els efectes abans esmentats, i per l'altre, que els materials emprats en la construcció d'eines i la rigidesa de la maquinària avancen dia a dia, els valors mínims i màxims recomanats són difícils d'obtenir i varien amb molta freqüència. Això fa difícil determinar quins són els valors a adoptar. Tot i això, en cas de no disposar d'aquets valors, podem prendre com a bons per l'acer i eines amb carboni, velocitats que oscil·lin entre els 60 i els 400 metres per minut.

2.2.2. Efecte de la velocitat d'avanç sobre la rugositat superficial

En cada tipologia de mecanitzat, l'eina deixa unes marques sobre la peça que són degudes a diferents factors com poden ser la velocitat de tall, l'avanç, l'angle de tall de l'eina, la profunditat de passada, el temps de mecanitzat, etc.

Aquestes marques juntament amb el desgast de l'eina fan que hi hagi una variació de la rugositat superficial, això dificulta la determinació de la rugositat superficial.

Per això hi ha diferents autors que han centrat alguns dels seus estudis en determinar algunes fórmules per a poder preveure el valor d'aquest paràmetre.

Dues fórmules proposades per diferents autors, però alhora igual de correctes, són les següents:

$$R_a = 2,95 \cdot f^{0,7} \cdot r^{0,4} \cdot T^{0,3} \quad (\text{Eq. 1})$$

On:

R_a = rugositat superficial (μm)

f = velocitat d'avanç (mm/rev)

r = radi de punta de l'eina (mm)

T = temps de tall (min.)

Mentre que l'altre fórmula és:

$$R_a = 1,22 \cdot 10^5 \cdot M \cdot f^{1,004} \cdot v^{-1,252} \quad (\text{Eq. 2})$$

On:

R_a = rugositat superficial (μm)

f = velocitat d'avanç (mm/rev)

v = velocitat de tall (m/min.)

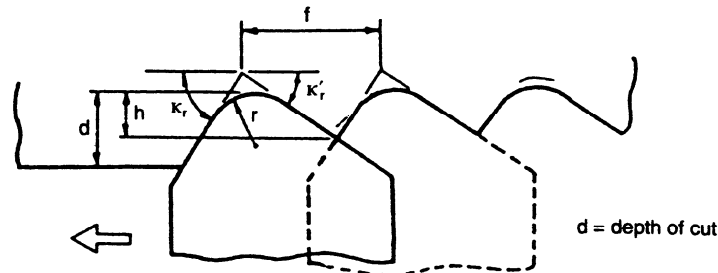
$M = r^{-0,714} \cdot \text{BHN}^{-0,323}$

BHN = duresa del material segons l'escala Brinell

A causa del gran nombre de factors que intervenen en les anteriors fórmules, s'han realitzat alguns estudis geomètrics de la rugositat superficial en les operacions que engloben el tornejat. Aquests estudis defineixen diferents casos:

Cas 1

L'eina avança en la direcció de la fletxa i la zona recta de la cara de tall secundària està tallant.



a. Case 1

Figura 1: Casos 1 i 2

Utilitzant relacions geomètriques, i quan la velocitat d'avanç (mm/rev) és més de dues vegades major al radi de punta de l'eina (mm), la rugositat de pic i de vall a partir de l'avanç i les característiques geomètriques de l'eina ve donada per:

$$h = f \frac{\sin k_r \cdot \sin k_r'}{\sin(k_r + k_r')} - r \left\{ \frac{\cos[(k_r - k_r')/2]}{\cos[(k_r + k_r')/2]} - 1 \right\}$$

(Eq. 3)

On:

h = alçada de la rugositat entre pic i vall (mm)

f = velocitat d'avanç (mm/rev)

r = radi de punta de l'eina (mm)

K_r = angle de posició principal

K_r' = angle de posició secundari

Cas 2

Com en el cas 1, la figura anterior, l'eina avança segons la direcció de la fletxa. Es diferencia però del cas anterior en què aquest té en compte quan la part recta de la cara de tall secundària talla la part corba del tall.

Per $k_r > k_r'$; l'alçada de la rugositat mesurada entre pic i vall ve donada per:

$$h = r (1 - \cos k_r') + f \sin k_r' \cdot \cos k_r' - \sin k_r' (2rf \sin k_r' - f^2 \sin^2 k_r')^{0.5}$$

(Eq. 4)

On:

h = alçada de la rugositat entre pic i vall (mm)

f = velocitat d'avanç (mm/rev)

r = radi de punta de l'eina (mm)

K_r = angle de posició principal

K_r' = angle de posició secundari

Cas 3

En aquest cas el tall es produeix a la curvatura d'ambdós costats de l'eina.

Per $f < r$, la rugositat mesurada a partir de l'alçada entre pic i vall s'obté a partir de la següent fórmula simplificada, vàlida en un percentatge molt elevat de casos.

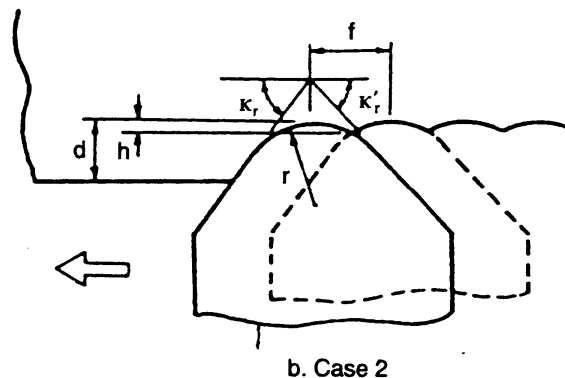


Figura 3: Cas 3

$$h = \frac{f^2}{8r}$$

(Eq. 5)

On:

h = alçada de la rugositat entre pic i vall (mm)

f = velocitat d'avanç (mm/rev)

r = radi de punta de l'eina (mm)

Dels diferents casos exposats, el cas que ha agafat més força per relacionar la rugositat superficial i la velocitat d'avanç és la exposada al cas 3.

En l'anterior fórmula s'utilitza l'alçada de rugositat entre pic i vall, que no és el factor més comú per expressar la rugositat superficial sinó que, la forma més comuna d'expressar la rugositat superficial, és la següent:

$$\frac{R_a}{R_t} = 0,256$$

(Eq. 6)

Combinant les dos fórmules anteriors ens queda la següent fórmula:

$$f = \left(\frac{8 \cdot r \cdot R_a}{0,256} \right)^{1/2}$$

(Eq. 7)

Assumint que el radi de punta pot oscil·lar entre 0,4 i 1,6 mm, la fórmula es pot simplificar quedant de la següent manera:

$$\begin{aligned} f_{\text{smax}} &= 0,1 \cdot R_a \text{ per } R_a \leq 3,2 \\ f_{\text{smax}} &= 0,18 \cdot R_a^{0,5} \text{ per } R_a > 3,2 \end{aligned}$$

(Eq. 8)

2.2.3. Efecte de la profunditat de passada sobre la rugositat superficial

Segons l'apartat anterior, podem afirmar que la profunditat de passada no afecta a la rugositat superficial, però això només ho podem afirmar de forma teòrica, ja que a la pràctica s'ha comprovat que aquesta afirmació no és certa, i per tant, sí que afecta la profunditat de passada sobre la rugositat superficial.

Per quantificar això, s'han realitzat nombrosos estudis que han obtingut diferents relacions entre factors com poden ser passada-radi de punta de l'eina, radi de punta de l'eina-rugositat superficial, passada-rugositat superficial. Finalment, tenint en compte aquestes relacions i l'experiència de fabricants i usuaris, s'ha obtingut la següent fórmula experimental:

$$a = \frac{32 \cdot R_a}{BHN^{0,8}}$$

(Eq. 9)

On:

 R_a = rugositat superficial (μm)

BHN = duresa del material donada en l'escala Brinell

a = profunditat de passada (mm)

Seguint la nomenclatura de l'algorisme la fórmula queda de la següent manera:

$$a_{s \max} = \frac{32 \cdot R_a}{BHN^{0,8}}$$

(Eq. 10)

On $a_{s \max}$ = profunditat màxima de passada a utilitzar en la passada d'acabat obeint a la restricció imposada per la rugositat superficial especificada.

Aquest valor només serà vàlid per a les passades d'acabat, mentre que per a les passades de desbast s'utilitzarà la variable a_{\max} obeint també a totes les restriccions tècniques imposades en el capítol 2.1.

2.3. Restriccions operacionals i dependents

En aquest capítol tractarem, d'explicar la relació entre els paràmetres descrits en capítols anteriors com poden ser: la profunditat de passada sobre la velocitat d'avanç i la profunditat de passada sobre l'operació escollida. Les anomenarem restriccions dependents pel fet que unes depenen directament de les altres.

2.3.1. Profunditat de passada en funció de la velocitat d'avanç

Un dels factors que afecten directament al procés de mecanitzat és l'embridament de la peça. Tant la seva ubicació com la seva tipologia imposen restriccions, el resultat de les quals, són unes forces exercides sobre a la peça. Les forces en menció són [Hallevi and Weill, 1998]:

- Frd: Força per sobre de la qual es produeix el moviment de la peça.
- Frk: Força per sobre de la qual la peça s'esquinça degut a l'esforç a torsió.
- Frc: Força per sobre de la qual apareixen esforços de compressió no admissibles sobre la peça.
- Frq: Força per la qual es superarà l'angle de torsió admissible.
- Frt: Força per sobre la qual es superarà el parell màxim admissible.
- Frb: Força que provocarà el doblegat de la peça per sobre els valors admissibles.
- Ftt: Força per sobre de la qual es doblegarà el suport de l'eina.
- Frm: Força màxima que pot proporcionar la màquina.

Un cop obtingut el valor de les diferents forces que afecten al procés, el que cal és reduir les forces a les tres components que formen l'espai F_{rx} , F_{ry} , i F_{rz} i obtenint així com a límit superior, la menor de totes elles.

En les operacions de tornejat, les forces que es produeixen es poden reduir de la següent manera:

$$F_z = C_p \cdot a \cdot f^{0,75}$$

(Eq. 11)

On:

F_z = Força assolida en el procés de tornejat (Newtons)

C_p = Força de tall específica. Paràmetre tabulat en funció de les característiques del material i el tipus d'operació que pren un valor de 220 en els acers més utilitzats en operacions de tornejat

a = profunditat de passada (mm)

f = velocitat d'avanç (mm/rev)

De la fórmula anterior aïllant la profunditat de passada, que és el que ens interessa, ens queda de la següent forma:

$$a = \frac{F_z}{C_p \cdot f^{0,75}}$$

(Eq. 12)

Anomenem velocitat d'avanç f_{smax} a la velocitat màxima admissible per garantir l'acabat superficial exigít en les especificacions, i a partir d'aquesta s'obté la profunditat de passada requerida en la passada d'acabat.

El mínim entre les velocitats màximes permeses pels diferents criteris tècnics descrits en el capítol 2.1 correspon a la velocitat d'avanç f_{amax} . Si es pren com a referència s'obté la profunditat de passada a_{cmin} .

2.3.2. Profunditat de passada en funció de l'operació escollida

Com s'ha comentat en apartats anteriors, sempre es procura que l'eina deixi el mínim de marca a la peça per tal de tenir un bon acabat superficial. És per això, que en ocasions s'ha de realitzar una passada de semi-acabat per tal de complir les especificacions, que a vegades seran inviàbles per part de les restriccions tècniques.

Per realitzar la passada de semi-acabat hem de tenir en compte els següents factors:

Tolerància dimensional: A causa de les passades de desbast que es realitzen dins els marges ja establerts, la profunditat de passada màxima i la velocitat d'avanç màxima, es poden provocar alteracions dimensionals que, malgrat es realitzi la passada d'acabat o fins i tot, la passada de semi-acabat, no sigui suficient per obtenir la rugositat superficial desitjada.

Integritat superficial: Com és ben sabut, en qualsevol procés de mecanitzat té lloc un enduriment del material treballat. I aquest depèn tant de la velocitat d'avanç com del tipus de material. Això ens obliga a imposar, en funció de la duresa superficial de la peça, les restriccions oportunes sobre la velocitat d'avanç i, en últim terme, sobre la profunditat de passada durant l'acabat superficial.

Rugositat superficial: En les passades de desbast els criteris econòmics imposen que les profunditats de passada i les velocitats d'avanç han de ser el major possible. Però en molts casos l'acabat que s'obté excedeix les limitacions acceptades per l'usuari. Així doncs, cal realitzar una darrera passada (passada d'acabat) per eliminar aquest excés de rugositat.

Tolerància geomètrica: Per tal de minimitzar el temps, en les operacions de desbast, es cerquen valors de profunditats i avanços relativament elevats. Conseqüentment les forces generades tenen també una magnitud important i poden provocar fàcilment alteracions geomètriques. Podem contrarestar-ho amb la passada d'acabat sempre i quan no s'excedeix la profunditat de passada màxima calculada a partir de les restriccions tècniques.

Degut a que tots seria inviable quantificar tots els factors anteriors, cal recórrer a les taules següents obtingudes a partir de diversos assajos:

AVANÇ (mm/rev)	PROFUNDITAT DE PASSADA (mm)													
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10	11
0,10	0,10	0,13	0,15	0,20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0,20	0,15	0,17	0,19	0,23	0,28	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0,30	0,17	0,20	0,25	0,30	0,39	0,43	--	0,61	0,74	0,86	--	--	--	--
0,40	--	0,28	0,30	0,38	0,46	0,54	0,60	0,76	0,92	1,06	1,24	1,37	--	--
0,50	--	0,32	0,36	0,45	0,54	0,63	0,71	0,90	1,08	1,26	1,46	1,61	1,80	2,00
0,60	--	--	0,41	0,52	0,62	0,73	0,82	1,03	1,24	1,45	1,65	1,85	2,06	2,27
0,70	--	--	0,46	0,58	0,70	0,82	0,92	1,16	1,39	1,62	1,85	2,08	2,31	2,55
0,80	--	--	0,51	0,64	0,77	0,90	1,01	1,28	1,54	1,79	2,05	2,30	2,56	2,82
0,90	--	--	--	0,81	0,97	1,13	1,30	1,62	1,98	2,27	2,59	2,92	3,24	3,56
1,00	--	--	--	1,00	1,20	1,40	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00	4,40

Taula 3. Irregularitats introduïdes en funció de la profunditat de passada i la velocitat d'avanç.

3. RESTRICCIONS I PARÀMETRES

3.1. Introducció

L'obra de G. Hallevi i R.D. Weill, "Principles of process planning. A logical approach" (1995), ha servit de base per al planteig i desenvolupament de l'algorisme. Malgrat tot, han estat necessàries algunes modificacions, respecte la metodologia proposada pels autors, per ser adaptada a l'objectiu del projecte.

Per a l'elaboració d'una peça per arranc de ferritja i decisió dels paràmetres de tall i les operacions necessàries per a dur-la a terme, cal tenir en compte els factors que exerceixen algun tipus d'influència sobre aquest procés. Amb aquesta interpretació es pretén, justament, la recopilació esquemàtica de tots aquests factors influents.

3.2. Restriccions tècniques i econòmiques

Quan parlem de restriccions tècniques estem fent referència a les restriccions tecnològiques, i a les restriccions imposades per la màquina i/o l'eina. La resta de restriccions tècniques les trobarem englobades amb el nom d'altres restriccions, i inclouen les imposades pel material utilitzat i per la peça, així com les imposades pel propi usuari.

Aquest tipus de restriccions juguen un paper important en l'entrada (input) de l'algorisme, proporcionant els límits superiors i inferiors dels paràmetres de tall. La decisió d'aquests valors ens ve marcada per l'optimització del cost del procés. Així, el criteri econòmic actua dins el propi algorisme com a restricció en el moment de prendre decisions.

La velocitat d'avanç sobre el temps de mecanitzat, i per tant el cost, és lineal, en canvi el de la profunditat de passada és exponencial. I aquest fet esdevé un dels factors econòmics més importants i obliga a obtenir la profunditat de passada en funció de la velocitat d'avanç prefixada.

Veiem l'esquema de la influència dels factors tècnics i econòmics:

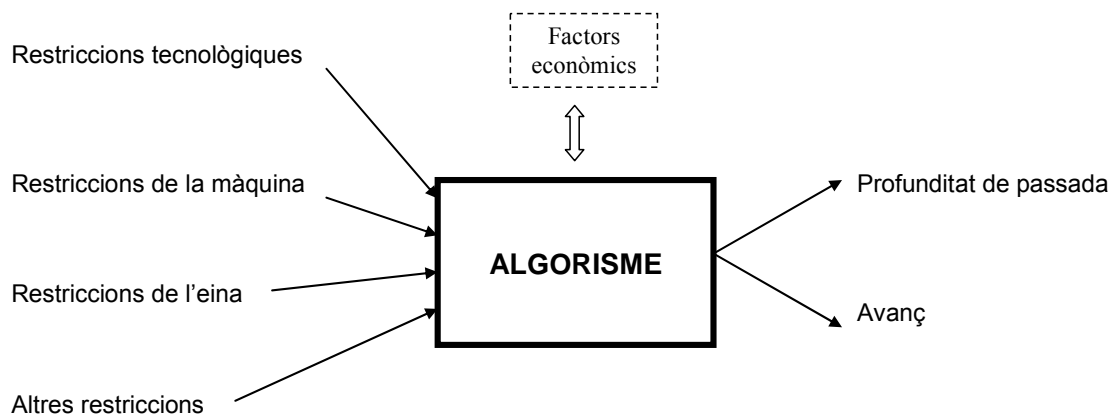


Figura 3: Esquema gràfic de l'algorisme de l'aplicació, en el punt de partida

3.3. Paràmetres de tall

Com s'ha parlat en capítols anteriors, les especificacions de la peça mantenen un lligam directe amb els paràmetres de tall. Aquesta relació, imposa tres noves restriccions que s'explicaran en els següents apartats.

3.3.1. Velocitat de tall

La velocitat de tall utilitzada repercuteix directament sobre la rugositat superficial, tal com s'ha vist en capítols anteriors. És per això que és necessari un lligam entre aquest paràmetre i l'introducció de dades a l'algorisme, tal com es mostra a la següent figura:

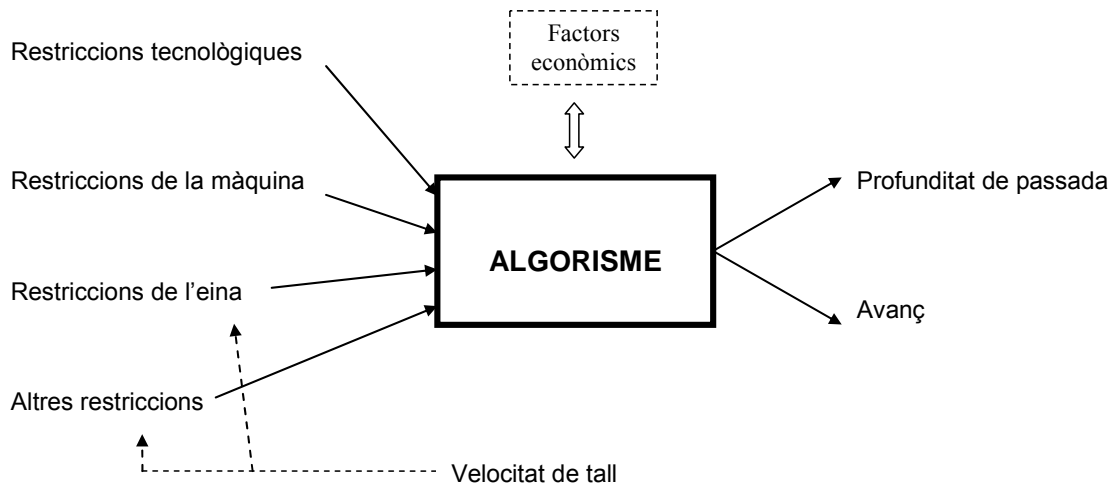


Figura 4: Esquema gràfic de l'algorisme de l'aplicació, un cop introduït el paràmetre de la velocitat de tall

3.3.2. Velocitat d'avanç

El paràmetre que exerceix una major influència sobre la rugositat superficial és, sens dubte, la velocitat d'avanç. Malgrat l'existència de diverses fórmules que ens permeten obtenir la rugositat a partir dels paràmetres de tall, l'enfocament general d'aquest projecte ens condueix a la utilització de la fórmula especificada a continuació, en que és conegut el paràmetre de rugositat superficial (R_a) imposat per les especificacions de la peça, i la incògnita a determinar és la velocitat d'avanç. Veiem doncs, aquesta fórmula:

$$\begin{aligned}
 f_{s\max} &= 0,1 \cdot R_a \text{ per } R_a \leq 3,2 \\
 f_{s\max} &= 0,18 \cdot R_a^{0,5} \text{ per } R_a > 3,2
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 8}$$

On:

$f_{s\max}$ = velocitat d'avanç màxima per a passades d'acabat (mm)

R_a = desviació aritmètica respecte la línia central (μm)

Si s'introdueix aquesta nova relació de paràmetres, s'obté els següents canvis en l'algorisme:

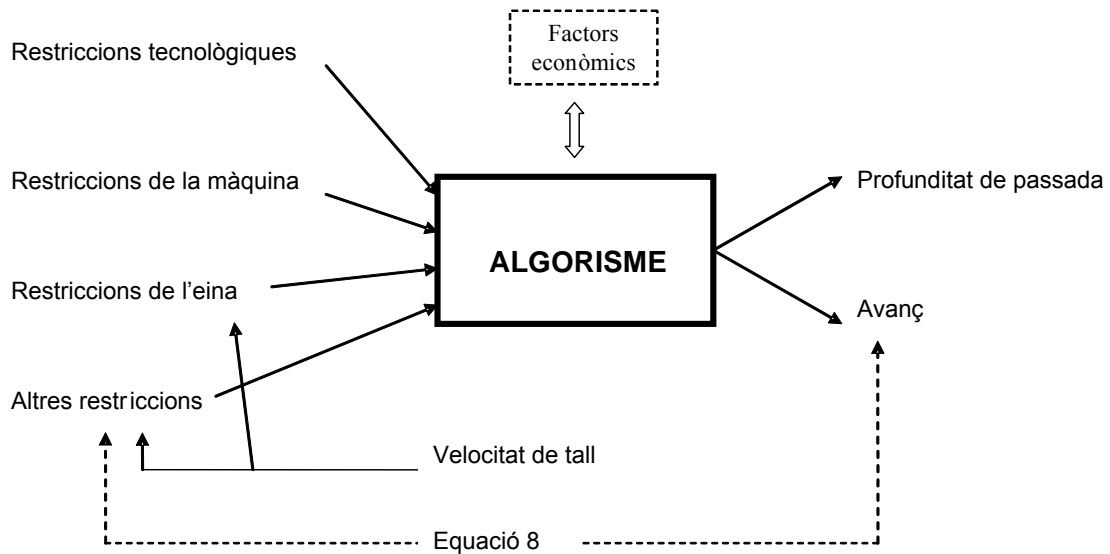


Figura 5: Esquema gràfic de l'algorisme de l'aplicació, un cop introduïda l'equació n° 8

3.3.3. Profunditat de passada

Arribat a aquest punt, sorgeix l'enfrontament entre el concepte teòric i l'experiència pràctica. Si bé la teoria ens diu que la profunditat de passada no exerceix influència sobre la rugositat superficial resultant de l'operació de mecanitzat, l'experiència ens parla del contrari.

Per intentar resoldre aquesta contradicció han estat necessaris múltiples assajos relacionant la profunditat de passada, el radi de l'eina i la rugositat superficial. Els resultats han conclòs amb la següent fórmula:

$$a_{s \max} = \frac{32 \cdot R_a}{BHN^{0,8}}$$

(Eq. 13)

On:

R_a = desviació aritmètica respecta la línia central avaluada (μm)

BHN = duresa del material donada en l'escala Brinell

a = profunditat de passada (mm)

$a_{s\max}$ = profunditat màxima de passada a utilitzar en la passada d'acabat obeint a la restricció imposada per la rugositat superficial especificada.

Seguint l'esquema de l'apartat anterior, s'obtenen els següents canvis un cop realitzada aquesta nova restricció:

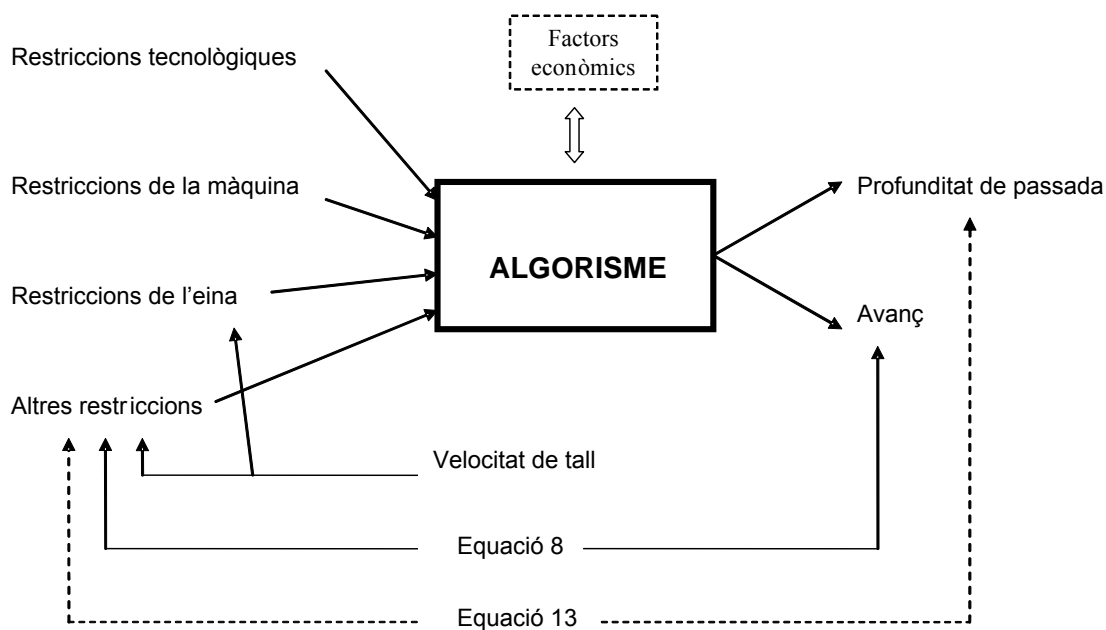


Figura 6: Esquema gràfic de l'algorisme de l'aplicació, un cop introduïda l'equació nº 13

3.3.4. Restriccions operacionals i dependents

Durant el procés d'arranc de ferritja apareixen dues restriccions que són producte del propi funcionament; aquestes són la força de compressió que ens limitarà l'avanç, i la força de torsió que ens limitarà la velocitat de tall. Per tant, previ al inici del procés, caldrà comprovar si l'eina permet els avanços i velocitats calculades sense comprometre'n el correcte funcionament. A continuació es detallen aquestes restriccions.

3.3.4.1. Profunditat de passada en funció de la velocitat d'avanç

Hem dit que el material de partida, la velocitat d'avanç i la profunditat de passada determinen les forces que es generen durant l'execució de les operacions d'un procés de conformació per arranc de ferritja. Seguint els criteris econòmics enunciats en el punt 3.2, obtenim la fórmula que permet determinar la profunditat de passada en funció de la força màxima permesa i la velocitat d'avanç per a l'operació de tornejat:

$$a = \frac{F_z}{C_p \cdot f^{0,75}}$$

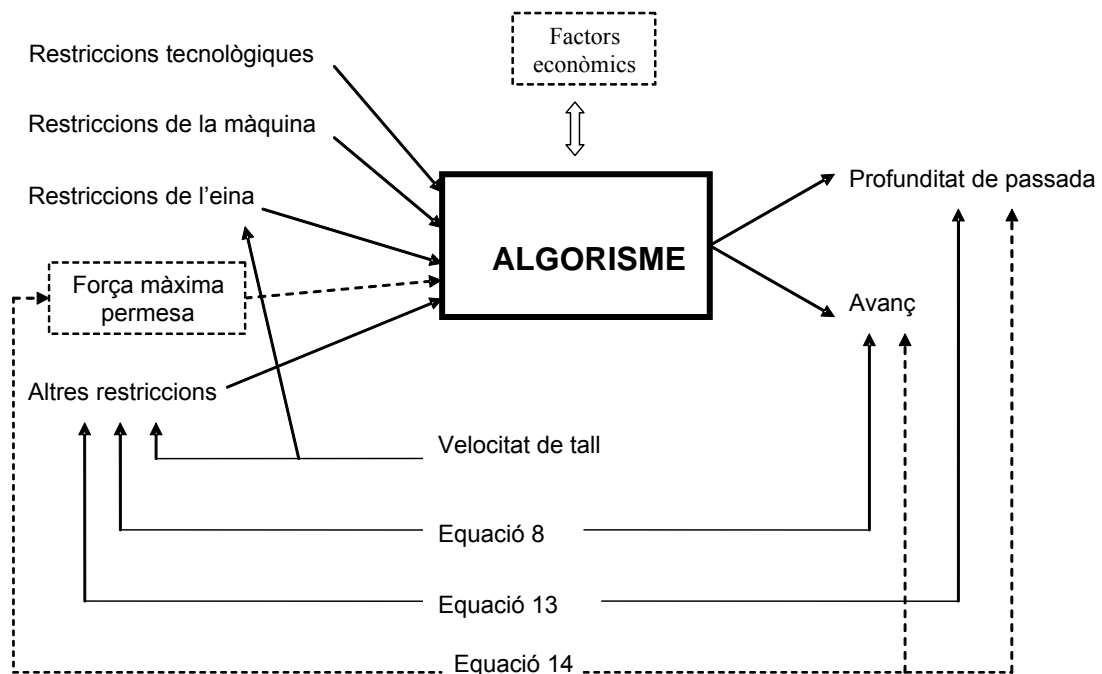
(Eq. 14)

On:

 F_z = Força assolida en el procés de tornejat (Newtons) C_p = Força de tall específica. Paràmetre tabulat en funció de les característiques del material i el tipus d'operació que pren un valor de 220 en els acers més utilitzats en operacions de tornejat a = profunditat de passada (mm) f = velocitat d'avanç (mm/rev)

Tal com hem vist en el punt 2.1.5., prenent com a velocitat d'avanç f_{amax} s'obté la profunditat de passada a_{cmin} i, si es té en compte les restriccions imposades per les forces màximes tolerables pel procés, optimitza la relació entre els paràmetres velocitat d'avanç i profunditat de passada.

Continuant amb l'esquema proposat per a l'algorisme, quan hi s'hi reflecteixen aquestes noves restriccions s'obté:



Il·lustració 7

4. ALGORISMES DE LES OPERACIONS DE REFRENTAT I RANURAT

4.1. Introducció a l'operació de refrentat

Primer de tot, definirem què és el procés de tornejat i les operacions que s'hi engloben. El tornejat és un procés de mecanitzat o de conformat per arranc de ferritja en el qual es treballa sobre una peça que està girant. En aquest procés podem trobar les principals operacions per al conformat de diverses peces: el cilindrada, el refrentat, el taladrat, el mandrinat, el ranurat-segat, el pefilat, el tornejat cònic, el roscat i el moletejat o grafilat.

Les operacions objectes d'aquest projecte són les operacions de refrentat i ranurat. Pel que fa al refrentat, entenem com a tal l'avanç de l'eina en direcció perpendicular a l'eix de rotació, aconseguint una cara plana, que de fet, és un espiral amb un pas molt petit (el pas és l'avanç) tal com es mostra a la figura 9:

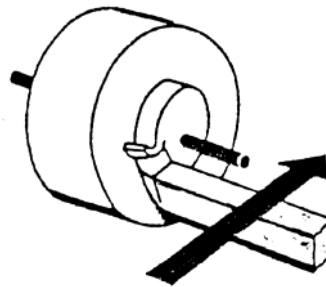


Figura 9: Operació de refrentat

4.2. Plantejament del refrentat

Vist ja l'algorisme que van plantejar en el seu moment els autors G. Hallevi i R.D. Weill, es podria plantejar l'algorisme de manera global adequat a l'operació de refrentat, que més endavant es desenvoluparà mitjançant els passos de l'algorisme.

Per començar, cal partir de la base que hi ha com a mínim dos possibles casos en que haurem d'utilitzar l'operació de refrentat. El primer és per netejar la cara, és a dir, com que habitualment es parteix d'una peça provinent d'un motlle, ens trobem en que la peça no sempre té les cares perpendiculars entre elles i per aconseguir-ho es refrenta la cara, això sí, agafant el mínim gruix possible però el just per mecanitzar tota la superfície de la cara i així aconseguir la perpendicularitat que volíem sense irregularitats.

El segon cas es dóna quan es parteix d'una longitud de peça més gran que la peça final a obtenir, llavors, s'utilitza el refrentat per arribar a la longitud desitjada de la peça acabada.

Pel que fa el primer cas, com que no es tracta d'una operació que habitualment pugui tenir més d'una passada, i a més, és una passada d'una profunditat petita no té interès pel que fa a l'objecte d'aquest projecte i per tant, es desestima. Així el projecte es centra en el segon cas, que sí té una aplicació més clara a l'hora d'utilitzar aquesta aplicació informàtica.

Situats en el segon cas s'han de plantejar diverses possibilitats que es poden donar al realitzar l'operació:

a) L'operació es pot realitzar tan sols amb una passada:

Aquest primer cas es dóna quan el gruix a mecanitzar (a_n) és menor a la profunditat màxima admissible en la passada d'acabat (a_{smax}). Aquest cas no és molt habitual, ja que a banda de tenir en compte les profunditats de passada també es tenen en compte les forces exercides sobre la peça i la rugositat superficial desitjada al final de l'operació. Si aquestes són menors o iguals a les admissibles significa que l'operació és factible de ser realitzada, ara bé, s'haurà d'estudiar amb quantes passades s'ha de realitzar per complir tots els requisits desitjats.

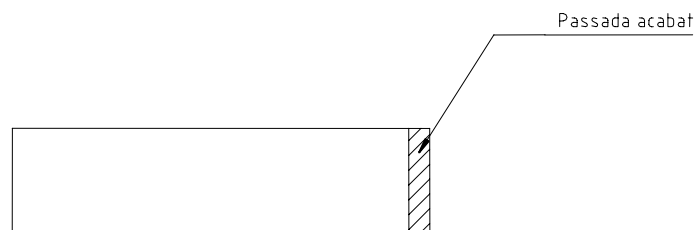


Figura 10: Esquema gràfic de l'operació que exemplifica el cas a)

b) L'operació es pot realitzar amb dues passades:

Aquest pas és possible quan el gruix a mecanitzar (a_n) és major a la profunditat màxima admissible en la passada d'acabat (a_{smax}), i alhora el gruix que resta per mecanitzar és menor o igual a la profunditat de passada a aplicar en la passada de semi acabat (a_s).

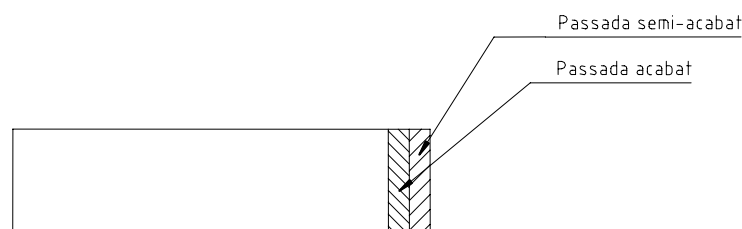


Figura 11: Esquema gràfic de l'operació que exemplifica el cas b)

c) L'operació es pot realitzar amb tres passades:

S'arribarà en aquest cas, sempre i quan, el gruix a mecanitzar (a_n) sigui major a la profunditat màxima admissible en la passada d'acabat (a_{smax}), i alhora el gruix que resta per mecanitzar sigui major a la profunditat de passada a aplicar en la passada de semi acabat (a_s) i el número de passades de desbast (B_i) sigui igual a 0.

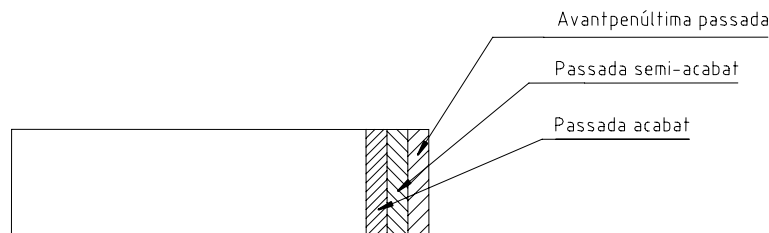


Figura 12: Esquema gràfic de l'operació que exemplifica el cas c)

d) L'operació es pot realitzar amb quatre o més passades

Finalment, aquest últim cas serà possible si el gruix a mecanitzar (a_n) és major a la profunditat màxima admissible en la passada d'acabat (a_{smax}), i alhora el gruix que resta per mecanitzar sigui major a la profunditat de passada a aplicar en la passada de semi acabat (a_s) i el número de passades de desbast (B_i) sigui major que 0.

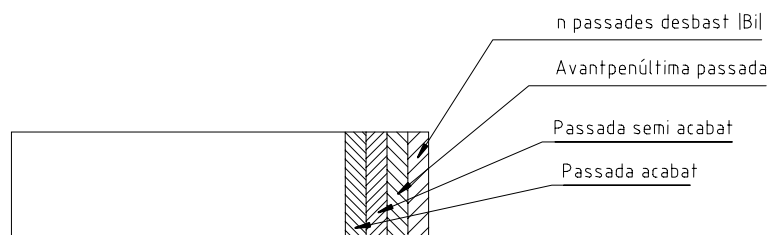


Figura 13: Esquema gràfic de l'operació que exemplifica el cas d)

4.3. Introducció de l'operació de ranurat

Com s'ha esmentat en l'apartat 4.1, la segona operació objecte del present projecte és el ranurat. El ranurat és l'operació en la qual es practica una ranura a la peça, per exemple, per a fixar un anell de retenció o per posar-hi una junta tòrica. També es pot fer sobre la cara plana de la peça, anomenat ranurat frontal, així com al interior de la peça. En aquesta operació l'eina ha de ser més tenaç i s'ha de refredar perquè s'escalfa molt en el

procés de mecanitzat. En les figures següents es mostra esquemàticament l'operació i un exemple del mateix:

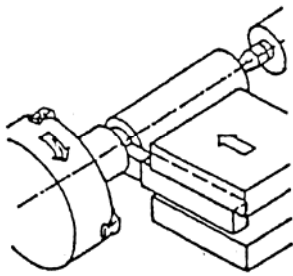


Figura 14: Operació de ranurat



Figura 15: Exemple d'una aplicació de l'operació de ranurat

4.4. Plantejament del ranurat

Pel que fa a l'operació de ranurat s'ha de diferenciar dos casos: el primer es dona quan l'amplada de l'eina és igual a l'amplada de la ranura a realitzar, i el segon quan l'amplada de l'eina és menor que l'amplada de la ranura a realitzar.

4.5. Anàlisi dels passos de l'algorisme per a les dues operacions

Degut a que l'algorisme per a les dues operacions estudiades són pràcticament semblants, excepte en alguns punts, només hi ha un algorisme general i he especificat en quins punts les operacions tenen variacions.

4.5.1. Pas 1

En aquest primer pas, primerament es realitza la recopilació d'entrades, que de fet són les restriccions tècniques que en apartats anteriors ja s'han explicat. Quan es tenen totes les dades, el següent punt a seguir és el càlcul de les variables $a_{s\max}$ i $f_{s\max}$ amb les fórmules següents:

$$a_{s\max} = \frac{32 \cdot R_a}{BHN^{0,8}}$$

(Eq. 15)

$$f_{s\max} = 0,1 \cdot R_a \text{ per } Ra \leq 3,2$$

$$f_{smax} = 0,18 \cdot R_a^{0,5} \quad \text{per} \quad Ra > 3,2$$

(Eq. 8)

Realitzat aquest càlcul, s'ha de fer un segon càlcul consistent en determinar la força màxima admissible, tant en la passada d'acabat com la de desbast, i la força màxima permessa, tant en la passada d'acabat com en la resta de passades, que dependran dels paràmetres tècnics i geomètrics definits a l'entrada de dades.

Força màxima admissible passada d'acabat en l'operació de refrentat:

$$F_{màxadm_acabat} = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \rho_{acabat}}{L^3} \quad (\text{Eq. 16})$$

Força màxima admissible passada de desbast en l'operació de refrentat:

$$F_{màxadm_desbast} = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \rho_{desbast}}{L^3} \quad (\text{Eq. 17})$$

Força màxima admissible passada d'acabat en l'operació de ranurat si l'embridament és simple:

$$F_{màxadm_acabat} = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \rho_{acabat}}{L^3} \quad (\text{Eq. 18})$$

Si l'embridament és doble, llavors:

$$F_{màxadm_acabat} = \left(\frac{2 \cdot \arccos\left(\frac{e}{\rho_{acabat} + e}\right)}{Lp} \right)^2 \cdot E \cdot I \quad (\text{Eq. 19})$$

igualment passa per les passades de desbast:

Embridament simple:

$$F_{màxadm_desbast} = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \rho_{desbast}}{L^3} \quad (\text{Eq. 20})$$

Embridament doble:

$$F_{m\grave{a}xadm_desbast} = \left(\frac{2 \cdot ar \cos\left(\frac{e}{\rho_{desbast} + e}\right)}{Lp} \right)^2 \cdot E \cdot I \quad (\text{Eq. 21})$$

Seguidament, obtinguts els valors, s'han de realitzar les següents comprovacions:

- $a_n > a_{amin}$ (a_n : gruix a mecanitzar; a_{amin} : profunditat de passada mínima admissible obtinguda per les variables d'entrada).
- Força màxima admissible > Força real
- $a_{cmin} \geq a_{amin}$ (a_{cmin} : profunditat de passada mínima per a una velocitat d'avanç determinada; a_{amin} : profunditat de passada mínima admissible obtinguda per les variables d'entrada).

Si totes aquestes verificacions es compleixen, llavors es podrà continuar endavant amb l'algorisme passant al pas 2, però si ocorre el contrari, s'haurà de retocar algun paràmetre d'entrada per permetre les anteriors verificacions; de no ser així serà inviable continuar l'operació endavant.

4.5.2. Pas 2

Un cop obtinguts els valors de a_n (gruix a mecanitzar) i a_{smax} (profunditat de passada màxima admissible en la passada d'acabat), aquest pas tracta d'identificar si l'operació es pot realitzar amb una sola passada o, per contra, se n'hauran de realitzar més d'una. Per a poder fer aquesta identificació s'hauria de revisar la següent condició:

- Si $a_n < a_{smax}$ es salta al pas 10 de l'algorisme.
- Si $a_n > a_{smax}$ es salta al següent pas (Pas 3).

4.5.3. Pas 3

Si s'arriba a aquest pas, significa que la condició $a_n > a_{smax}$ es compleix i que, per tant, l'operació no es pot realitzar amb una sola passada.

En aquest pas el que es farà és calcular a_{sm} , variable que d'alguna forma quantifica les irregularitats màximes que pot provocar la penúltima passada considerant que per optimitzar el cost de l'operació la passada d'acabat s'ha de realitzar a a_{smax} . Això es pot quantificar amb la següent fórmula:

$$asm = a_{smax} - a_{amin}$$

(Eq. 22)

4.5.4. Pas 4

A partir de la taula de l'apartat 2.3.2 cerquem a_s (profunditat de passada a aplicar en la passada de semiacabat) de la següent manera:

L'objectiu de la cerca a la taula és localitzar la casella on la velocitat d'avanç sigui la més gran possible però sempre complint que les irregularitats siguin iguals o menors a la variable a_{sm} .

Un cop obtingut el valor de a_s , llavors apliquem la següent condició:

- Si $a_s > 1,33 \cdot a_{cmin}$, llavors $a_s = 1,33 \cdot a_{cmin}$
- Si $a_s > a_{amax}$, llavors $a_s = a_{amax}$

En aquesta apartat finalment es continua amb el següent pas (Pas 5).

4.5.5. Pas 5

Es passa a calcular la variable PG (gruix que resta per mecanitzar tenint en compte que la profunditat de la passada d'acabat és a_{smax}).

$$PG = a_n - a_{smax}$$

(Eq. 23)

4.5.6. Pas 6

Un cop obtinguts els valors de PG i de a_s es procedeix a comparar-los:

- Si $PG < a_s$, llavors es salta al pas 11.
- Si $PG > a_s$, llavors es continua al següent pas (Pas 7).

Si $PG < a_s$ significa que l'operació es pot realitzar amb dues passades.
Un cop realitzada aquesta comparació, es pot continuar endavant amb l'algorisme.

4.5.7. Pas 7

S'arriba a aquest pas quan a l'operació és necessari realitzar més de dues passades.
En aquest pas es calcula el nombre de passades de desbast a realitzar amb la següent fórmula:

$$B_i = \frac{a_n - a_s - a_{s \max}}{1,33 \cdot a_{c \min}}$$

(Eq. 24)

On B_i és el nombre enter superior de passades de desbast a realitzar.

4.5.8. Pas 8

Llavors quan se saben el nombre de passades de desbast a realitzar es pot passar a calcular la profunditat de passada de les B_i primeres passades de desbast, amb la següent fórmula:

$$a_p = \frac{a_n - a_s - a_{s \max}}{B_i}$$

(Eq. 25)

4.5.9. Pas 9

En aquest pas es tracta de distingir si la profunditat de passada de les B_i primeres passades de desbast és major o menor a la profunditat de passada òptima. Aquesta distinció ha de complir la següent condició:

- Si $a_p \leq a_{c \min}$ es salta al pas 12.
- Si $a_p > a_{c \min}$ es salta al pas 13.

4.5.10. Pas 10

S'arriba a aquest pas a partir del pas 2, quan la condició $a_n < a_{s \max}$ es compleix.
Aquest pas és el pas on es generen les sortides de l'algorisme, és a dir, s'obtidrà els resultats de l'algorisme en una pantalla on es detallaran el nombre de passades, profunditats de passada i velocitats d'avanç.

4.5.11. Pas 11

Aquest pas és el consegüent del pas 6 pel compliment de la següent condició $PG < a_s$, és a dir, quan l'operació es pot realitzar tan sols amb dues passades. Igual que en el pas 10, aquest genera les sortides de l'algorisme.

4.5.12. Pas 12

Si s'arriba a aquest pas, vol dir que abans s'ha passat pel pas 9, complint que $a_p \leq a_{cmin}$. En aquest pas es tracta de calcular el nombre de passades de desbast i els paràmetres de tall. Per calcular el nombre de passades de desbast utilitzarem la següent fórmula:

$$n = \left[\frac{a_n - a_s - a_{smax}}{a_{cmin}} \right] + 1$$

(Eq. 26)

La profunditat de passada a adoptar en les n-1 primeres passades és: $p_1 = a_{cmin}$.

La velocitat d'avanç a adoptar en les n-1 primeres passades és: f_{amax} .

La profunditat de passada a adoptar a l'avantpenúltima passada és:

$$p_2 = a_n - (n-1) \cdot a_{cmin} - a_{smax} - a_s$$

(Eq. 27)

La velocitat d'avanç a l'avantpenúltima passada és de: f_{amax} .

Un cop establerts tots els paràmetres de tall, s'haurà de comprovar que les profunditats de passada obtingudes no són inferiors a a_{amin} .

Si la comprovació no és favorable, llavors s'haurà de diferenciar dues possibilitats:

La primera, $(n-1) \neq 0$ passades de desbast i una avantpenúltima passada. Per aquesta possibilitat les expressions necessàries per al càlcul són les següents:

$$p_1 = \frac{(n-1)a_{cmin} - (a_{amin} - p_2)}{n-1}$$

(Eq. 28)

$$p_2 = a_{a\min}$$

(Eq. 29)

L'altre possibilitat és la inexistència de les $n-1$ passades de desbast ($n-1 = 0$). Aquesta possibilitat està fora de l'àrea de treball de l'estratègia utilitzada en aquest algorisme i per tant s'aconsella emprar altres metodologies de càlcul.

Un cop resoltes les diferents possibilitats, només cal dir que les passades que resten, tant la d'acabat com la de semiacabat, són exactament iguals que en el cas de que l'operació es pugui realitzar en dues passades i, per tant, realitzarem un salt incondicional al pas 11. I l'únic que s'haurà de tenir en compte per finalitzar aquest pas és la variable PG (gruix que resta per mecanitzar en la passada de semiacabat realitzant la passada d'acabat a una profunditat $a_{s\max}$), amb la següent fórmula:

$$PG = a_n - ((n-1) \cdot p_1 + p_2) - a_{s\max}$$

(Eq. 30)

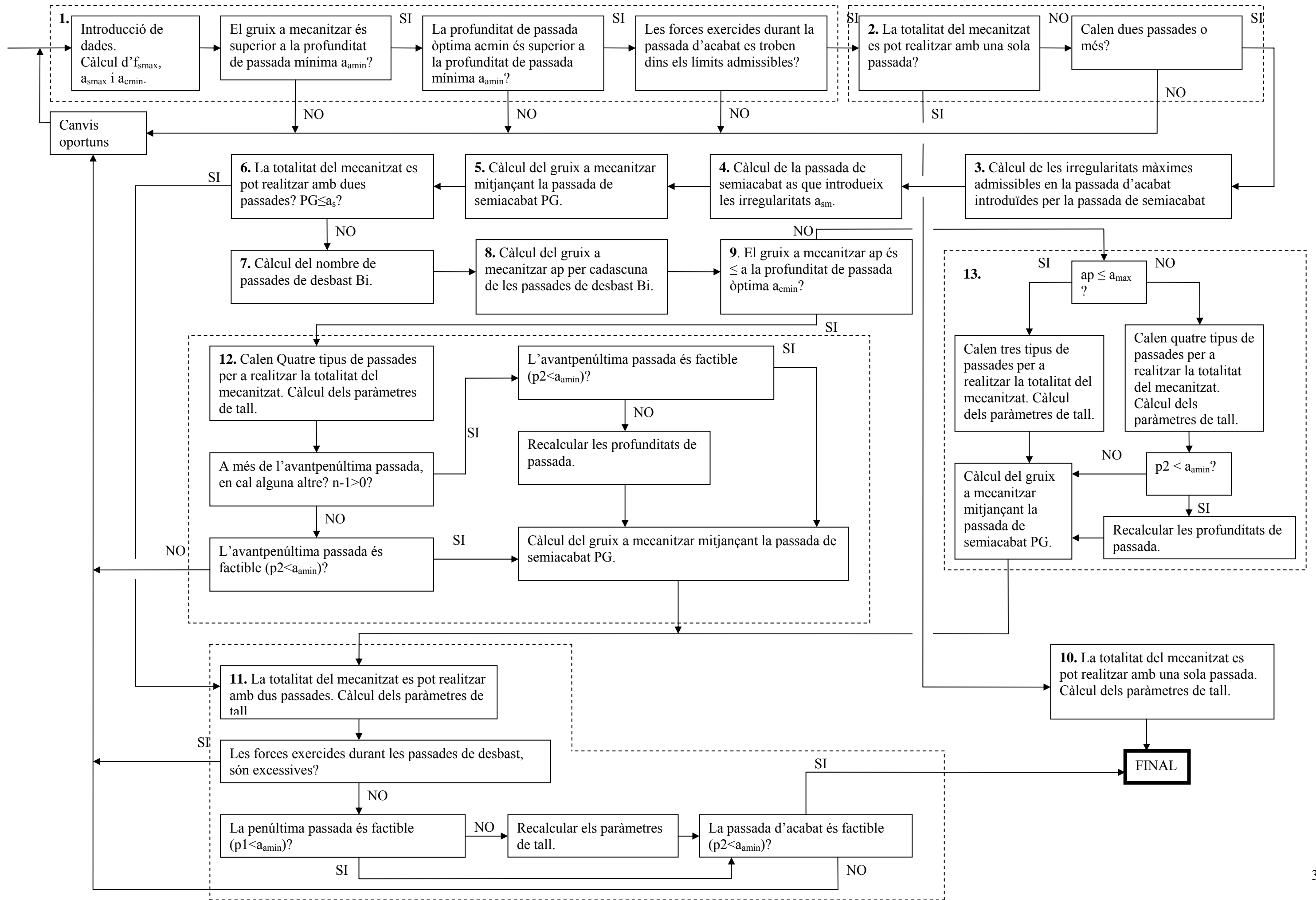
4.5.13. Pas 13

Degut al compliment de la condició $a_p > a_{c\min}$, plantejada al pas 9, s'ha arribat al pas 13. En aquest pas el que es determina és si $a_p < a_{\max}$. Si aquesta condició es compleix voldrà dir que per a realitzar l'operació seran suficients tres tipus de passades i llavors caldrà calcular els paràmetres de tall. Per altre banda, si la condició anterior no es compleix significarà que per realitzar l'operació necessitarem quatre tipus de passades. A continuació calcularem els paràmetres de tall i farem la següent comprovació:

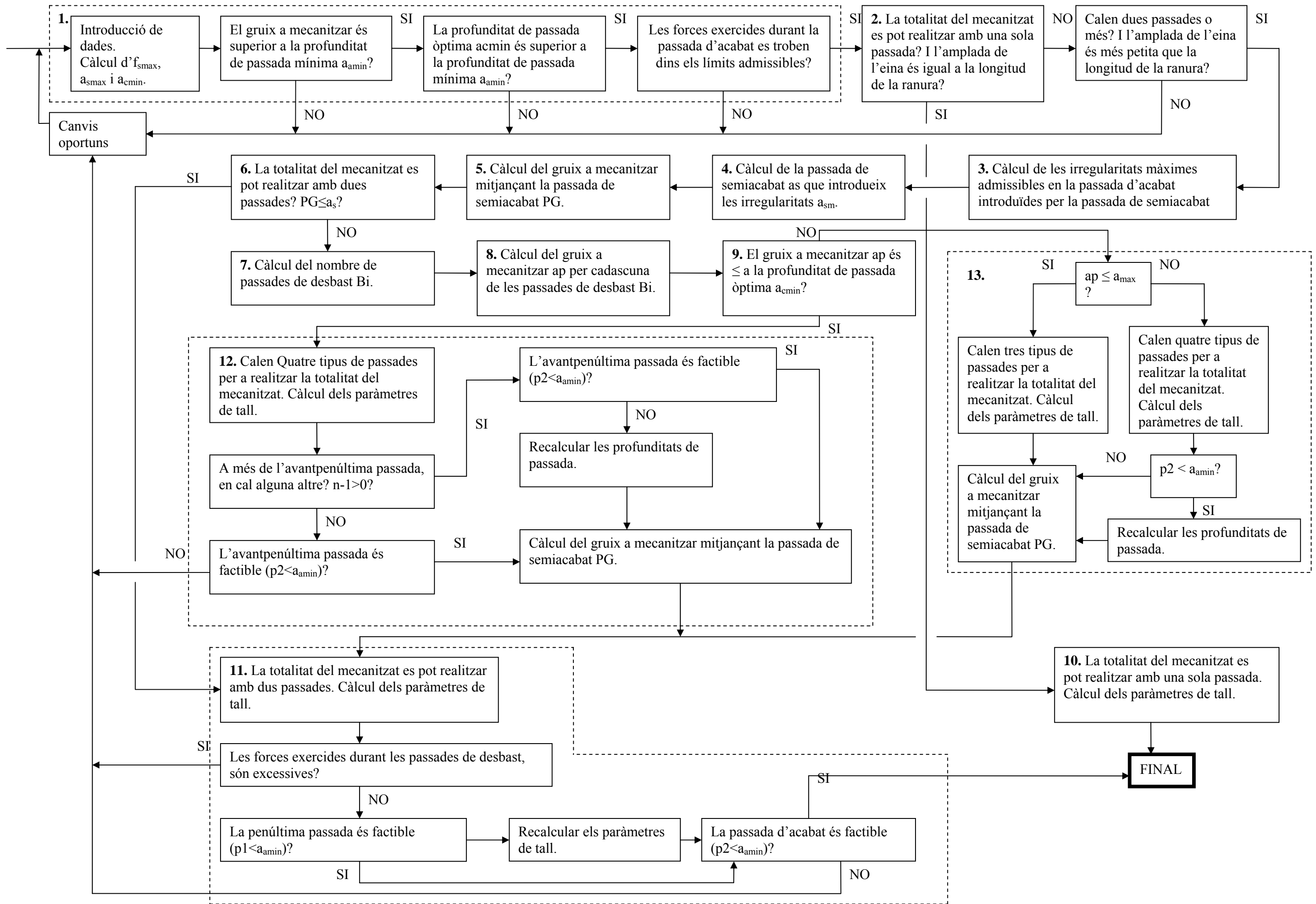
$$p_2 < a_{a\min}$$

Si es compleix, s'haurà de passar a calcular la variable PG, del contrari, s'haurà de recalculer les profunditats de passada i llavors també, calcular la variable PG. Un cop arribat aquest punt, igual que en el pas 12, haurem de fer un salt incondicional al pas 11, per poder finalitzar les dues últimes passades (passada de semiacabat i la passada d'acabat).

4.6. Diagrama de flux de l'operació de refrentat



4.7. Diagrama de flux de l'operació de ranurat



4.8. Interpretació de l'aplicació informàtica de l'operació refrentat

En aquest apartat, el que es pretén és explicar el funcionament bàsic de l'aplicació informàtica, les diferents pantalles interactives i les dades a entrar.

Es començarà per la pantalla d'inici del programa:

RESTRICCIONS TÈCNiques							
TECNOLÒGIQUES		MÀQUINA		EINA		ALTRES	
atmax		avmax		akmax		aumax	
atmin		avmin				aumin	
ftmax				fkmax		fumax	
ftmin		fvmin				fumin	
PARÀMETRES TECNOLÒGICS							
Duresa material	BHN	180	Rug. superficial	Ra μm	0.8	Gruix a mecanitzar	an mm
Deflexió acabat	δ_{finish} mm	0.016	Deflexió desbast	δ_{rough} mm	0.1	Inèrcia	I mm ⁴
Mòdul de Young	E N/mm^2	210000	Dist. eina-punt fixació	L mm	28	Força de tall	Cp N/mm^2 220

Retorn al menú anterior

CÀLCUL

Figura 16: Pantalla inicial de l'aplicació per a l'operació de refrentat on es mostren els 4 botons per a les diferents introduccions de dades

Al prémer els diferents botons de les restriccions tècniques, s'obre la pantalla respectiva que ens permet introduir els valors (mínims i màxims) tant per a la profunditat de passada com per a la velocitat d'avanç que es creuen necessaris. A continuació es mostra un exemple:

RESTRICCIONS TECNOLÒGIQUES	
Profunditat de passada màxima (atmax):	<input type="text"/> mm
Profunditat de passada mínima (atmin):	<input type="text"/> mm
Velocitat d'avanç màxima (ftmax):	<input type="text"/> mm/rev
Velocitat d'avanç mínima (ftmin):	<input type="text"/> mm/rev
<input type="button" value="D'acord"/> <input type="button" value="Anulla"/>	

Figura 17: Exemple d'una de les diferents pantalles d'introducció de dades

En aquesta pantalla, s'introdueixen les dades que interessin, però no és necessari entrar-les totes. Un cop introduïdes es prem al botó que mostra acord. I així successivament amb les diferents restriccions que hi ha a la pantalla inicial.

Per últim, dins la pantalla inicial, s'expliquen dos dels diferents paràmetres tecnològics que podem introduir dins el programa. Començant pel gruix a mecanitzar:

RESTRICCIONS TÈCNIQUES							
TECNOLÒGIQUES		MÀQUINA		EINA		ALTRES	
atmax		avmax		akmax		aumax	
atmin		avmin				aumin	
ftmax				fkmax		fumax	
ftmin		fvmin				fumin	
PARÀMETRES TECNOLÒGICS							
Duresa material	BHN	180	Rug. superficial	Ra μm	0.8	Gruix a mecanitzar	a _n mm
Deflexió acabat	δ_{finish} mm	0.016	Deflexió desbast	δ_{rough} mm	0.1	Inèrcia	I mm ⁴
Mòdul de Young	E N/mm^2	210000	Dist. eina-punt fixació	L mm	28	Força de tall	C _p N/mm^2 220

Retorn al menú anterior

CÀLCUL

Figura 18: Pantalla on es mostren els botons per a l'introducció d'alguns dels paràmetres tecnològics com són el gruix a mecanitzar i l'inèrcia

Quan es prem el botó amb el nom "Gruix a mecanitzar", ens apareix la següent pantalla:

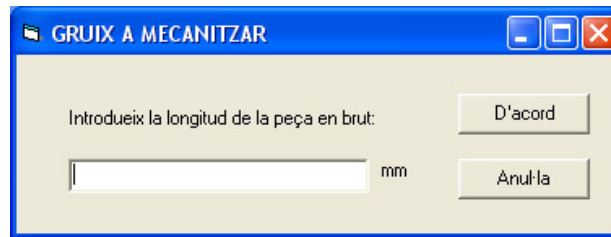


Figura 19: Pantalla per a l'introducció de la longitud de la peça en brut per el càlcul del gruix a mecanitzar

En aquest quadre de text s'ha d'introduir la longitud inicial de la peça abans de realitzar l'operació. Llavors es prem d'acord i ens apareix la següent pantalla:

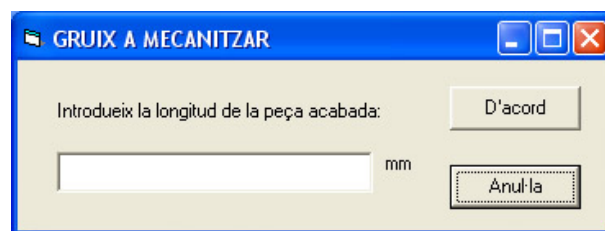


Figura 20: Pantalla per a l'introducció de la longitud de la peça acabada per el càlcul del gruix a mecanitzar

En el següent quadre de text s'ha d'introduir el valor de la longitud desitjada després d'haver realitzat l'operació. Això serveix per fer calcular la diferència entre la longitud de la peça inicialment i la longitud de la peça acabada; el resultat d'aquesta resta és el gruix total a mecanitzar a_n .

L'altre paràmetre a explicar és al càlcul de la inèrcia de diferents seccions, tal com es mostra a la següent figura:

CÀLCUL DE L'INÈRCIA

Escull el tipus de secció a mecanitzar:

Cilindre massís

Introdueix el diàmetre de la secció massissa:

Diàmetre (mm):

Cilindre tubular

Introdueix els diàmetres de la secció tubular:

Diàmetre exterior (mm):

Diàmetre interior (mm):

Rectangle massís

Introdueix els costats de la secció massissa:

Base (mm):

Alçada (mm):

Rectangle tubular

Introdueix els costats de la secció tubular:

Base exterior (mm):

Alçada exterior (mm):

Espessor (mm):

D'acord Anulla

Figura 21: Pantalla pel càlcul de l'inèrcia

En aquesta pantalla, primer de tot el que s'ha de fer és escollir el tipus de secció a mecanitzar. Un cop escollida el tipus de secció només ens apareixeran els quadres de text corresponents a la secció escollida i només caldrà omplir-los i prémer el botó "D'acord" per a què el programa pugui calcular la inèrcia polar de la secció.

Un cop introduïts tots els paràmetres desitjats de la pantalla inicial, s'ha de prémer el botó "Càlcul" i llavors apareix el resultat, pel qual la pantalla variarà en funció del número de passades. Tot seguit es mostra un exemple d'una de les pantalles de resultats:

**LA TOTALITAT DEL MECANITZAT REQUEREIX
QUATRE TIPUS DE PASSADES**

	Passada (mm)	Avanç (mm/rev)
5 primeres passades	5452542	54422
Avantpenúltima passada	5452542	5452542
Penúltima passada	5452542	5452542
Passada d'acabat	5452542	5452542

**RETORN A LA PANTALLA
D'INTRODUCCIÓ DE DADES**

Velocitat d'avanç

Profunditat de passada
Nº passades de desbast

Figura 22: Pantalla d'obtenció dels resultats per a l'operació de refrentat

4.9. Interpretació de l'aplicació informàtica de l'operació ranurat

Pel que fa a la interfície de l'operació de ranurat, la pantalla inicial és la següent:

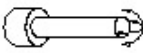

RESTRICCIONS TÈCNiques							
TECNOLÒGIQUES		MÀQUINA		EINA		ALTRES	
atmax		avmax		akmax		aumax	
atmin		avmin				aumin	
ftmax				fkmax		fumax	
ftmin		fvmin				fumin	
PARÀMETRES TECNOLÒGICS							
Duresa material	BHN	180	Rug. superficial	Ra μm	0.8	Profunditat ranura an1 (mm)	10
Deflexió acabat	δ_{finish} mm	0.016	Deflexió desbast	δ_{rough} mm	0.1	Inèrcia	I mm ⁴
Mòdul de Young	E N/mm^2	210000	Dist. eina-punt fixació	28	Força de tall	Cp N/mm^2	220
			Amplada eina	3			
Embridament		<input checked="" type="radio"/> Simple  <input type="radio"/> Doble 		Tipologia d'embridament			
Retorn al menú anterior		CÀLCUL					

Figura 23: Pantalla inicial de l'aplicació per a l'operació de ranurat on es mostren els botons afegits per aquesta operació

En aquesta operació s'ha introduït nous paràmetres com: l'amplada de l'eina, la profunditat de la ranura, la longitud de la ranura i la tipologia d'embridament. Per realitzar l'operació de refrentat l'eina es desplaçarà en dos direccions diferents, una perpendicular a l'eix de rotació de la peça i l'altre perpendicular a l'eix de rotació de la peça. Malgrat tot, no sempre serà en les dues direccions, sinó que també serà possible que es desplaci en una sola direcció depenent de la longitud de la ranura, tal com es mostren en les següents figures:

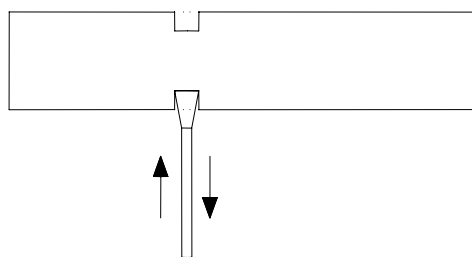


Figura 24: Esquema gràfic on es reflecteix el moviment de l'eina en una sola direcció

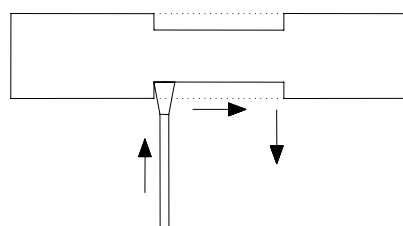


Figura 25: Esquema gràfic on es reflecteix el moviment de l'eina en dos direccions

La primera figura es dona quan l'amplada de l'eina és igual a la longitud de la ranura, en canvi, quan la longitud de la ranura és més gran que l'amplada de l'eina es passa al cas de la figura de la dreta. El moviment de l'eina perpendicular a l'eix de rotació també el es pot

anomenar "Entrada d'eina", tal com s'ha fet a la pantalla de resultats de l'aplicació informàtica, i passada, quan és el moviment paral·lel a l'eix de rotació.

El funcionament és el mateix que en l'operació de refrentat, s'ha de prémer els botons de les diferents restriccions tècniques, on sortiran les corresponents pantalles per a introduir les dades. Un cop fet això, s'entren els paràmetres tecnològics, tal com s'ha explicat a l'operació de refrentat. Finalment seleccionem la tipologia d'embridament desitjada i ja podem prémer el botó "Càlcul". A partir d'aquí, igual que a l'operació anterior, es tenen diferents pantalles possibles com per exemple

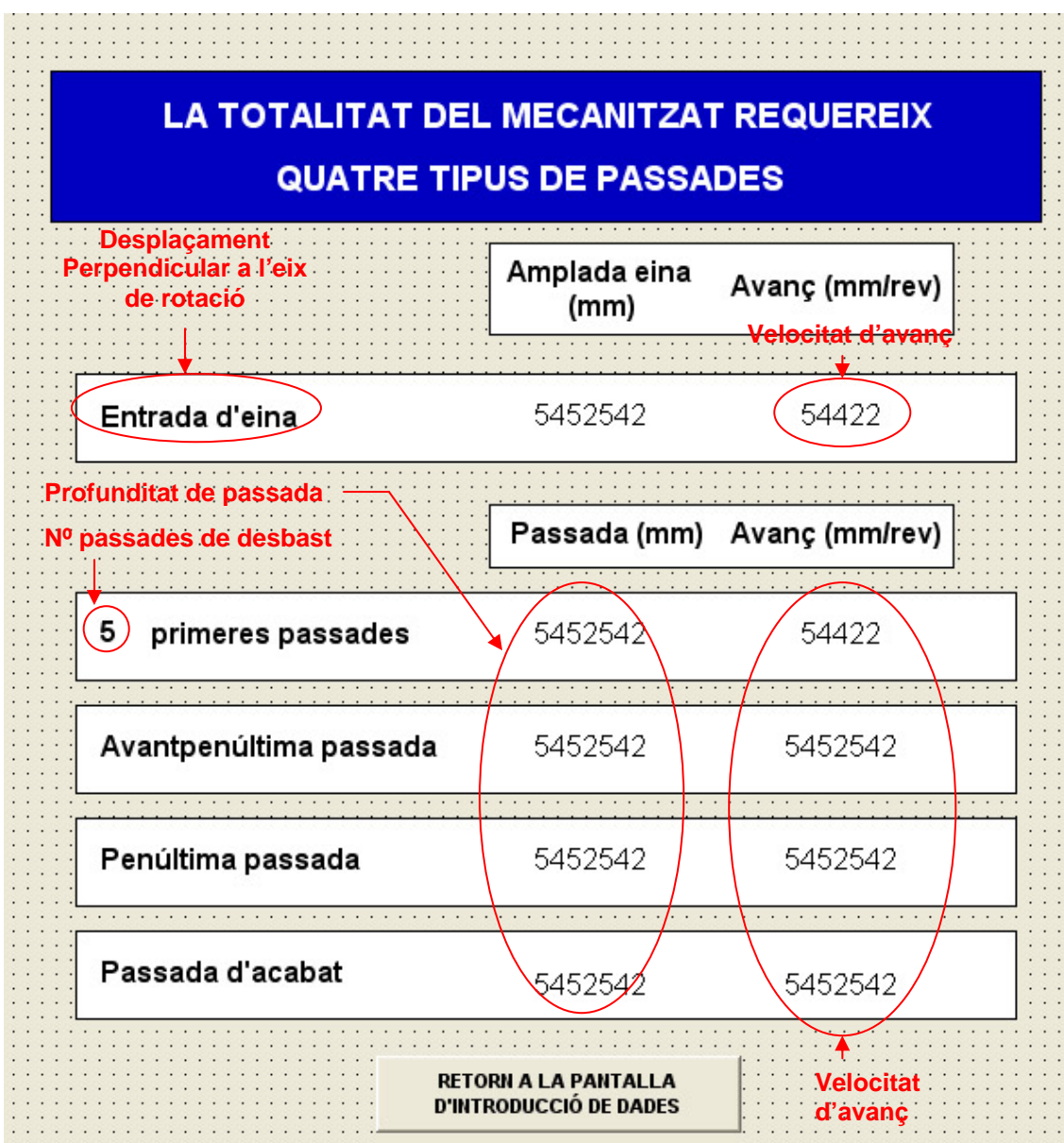


Figura 26: Pantalla d'obtenció de resultats per a l'operació de ranurat

5. RESUM DEL PRESSUPOST

El cost per dur a terme el present projecte consta tan sols d'una part.

La part en qüestió és la de la realització i redacció del present projecte sense un cost d'execució de projecte ja que l'execució és el propi projecte englobant l'aplicació informàtica desenvolupada.

A partir d'aquí, es pot dir que el que es presenta en aquest document és més aviat una factura que en pressupost, on el que es compta són les hores per haver realitzat el projecte tant de la part d'enginyeria, d'informàtica com de la redacció.

El pressupost de realització del projecte suma un total de deu mil dos-cents vuitanta-tres euros amb noranta-vuit cèntims d'euro (10.283,98€).

6. CONCLUSIONS

La realització d'aquest projecte, des d'un inici, va tenir un objectiu clarament establert, i no era d'altre, que la realització d'una aplicació informàtica que permetés l'obtenció dels paràmetres necessaris per a la realització dels processos de refrentat i ranurat, tenint en compte les restriccions marcades per l'usuari. Malgrat esser aquest l'objectiu final d'aquest projecte, es fa afegir la necessitat de marcar-ne d'altres secundaris que servissin de guia per a l'obtenció del primer.

A trets generals, els objectius han estat assolits. S'ha treballat en el programa informàtic fins a obtenir una eina útil per a l'usuari. La intenció sempre ha estat la d'obtenir una aplicació informàtica senzilla d'utilitzar, a manera de finestres fàcilment executables i amb instruccions clares i precises per a l'usuari. Alhora, el programa permet la detecció d'errors en l'entrada de dades i proposa possibles solucions per a l'usuari.

L'estudi de l'algorisme dels steps de G. Hallevi i R.D. Weill, recollit en el segon capítol d'aquest projecte, ha permès la readaptació d'aquest per a la realització dels algorismes corresponents als processos de refrentat i de ranurat. S'han obtingut uns

algorismes clars i concisos, amb un esquema de fàcil aplicabilitat. Com ja s'ha dit amb anterioritat, aquest esquemes han estat la base per a la realització amb èxit de la corresponent aplicació informàtica, que permet, a través de la introducció de dades, tant reals com fictícies, la comprovació de l'eficàcia i funcionalitat dels corresponents algorismes.

Finalment, tal com també figura en els objectius, l'aplicació informàtica de refrentat i de ranurat forma part d'un projecte major, molt més ambiciós, que és la creació d'una aplicació per al càlcul de totes les operacions d'arranc de ferritja. Abans que el present projecte, s'han realitzat dos projectes més amb la creació d'aplicacions d'altres operacions d'aquest procés. Així, doncs, resta per a un futur, la creació de les operacions que encara manquen per a completar el programa d'arranc de ferritja i alhora, caldrà en últim terme, un projecte que coordini totes aquestes operacions que d'altres haurem creat, per obtenir finalment el programa que m'ha motivat a la realització d'aquest projecte.

Jordi Martí Bahí
31 Maig 2007

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present projecte està format pels documents que s'enumeren a continuació:

- Document nº1: Memòria
- Document nº2: Annex del Pressupost

8. BIBLIOGRAFIA

- Halleli G., Weill R. D., Principles of process planning. A logical approach, Chapman & hall, London, First edition 1995.
- Garcia de Jalón, J., Ignacio Rodriguez, J., Brazález, A., Aprende Visual Basic 6.0 como si estuviera en primero, Universidad de Navarra, agosto 1999.

9. GLOSSARI

- **a**: profunditat de passada.
- **a_{amax}**: Mínim de (a_{tmax} a_{vmax} a_{kmax} a_{umax})
- **a_{amin}**: Màxim de (a_{tmin} a_{vmin})
- **a_{cmin}**: profunditat de passada mínima per a una velocitat d'avanç determinada.
- **a_{kmax}**: profunditat de passada màxima. (restriccions de l'eina)
- **a_n**: gruix a mecanitzar.
- **a_p**: profunditat de passada de les B_i primeres passades de desbast.
- **a_s**: profunditat de passada a aplicar en la passada de semi-acabat.
- **a_{sm}**: irregularitats màximes que pot provocar la penúltima passada.
- **a_{smax}**: profunditat màxima de passada a utilitzar en la passada de d'acabat obeint a la restricció imposada per la rugositat superficial especificada.
- **a_{tmax}**: profunditat de passada màxima. (restriccions tecnològiques)
- **a_{tmin}**: profunditat de passada mínima. (restriccions tecnològiques)
- **a_{umax}**: límit superior per a la profunditat de passada. (altres restriccions)
- **a_{umin}**: límit inferior per a la profunditat de passada. (altres restriccions)
- **a_{vmax}**: límit superior per a la profunditat de passada. (restriccions de la màquina)
- **a_{vmin}**: límit inferior per a la profunditat de passada. (restriccions de la màquina)
- **BHN**: Duresa del material segons l'escala Brinell.
- **B_i**: número de passades de desbast.
- **BUE**: *Built up edge*.
- **CAPP**: *Computer Aided Process Planning*. Sistema de planificació de processos assistit per ordinador.
- **CIM**: *Computer Integrated Manufacturing*. Integració de la producció.
- **C_p**: força de tall específica.
- **E**: mòdul de Young.
- **f**: velocitat d'avanç.
- **f_{amax}**: Mínim de (f_{tmax} f_{kmax} f_{umax})
- **f_{amin}**: Màxim de (f_{tmin} f_{vmin})
- **f_{kmax}**: velocitat d'avanç màxima. (restriccions de l'eina)
- **F_{rb}**: força que provocarà el doblegat de la peça per sobre els valors admissibles.
- **F_{rc}**: força per sobre de la qual apareixen esforços de compressió no admissibles sobre la peça.
- **F_{rd}**: força per sobre de la qual es produeix el moviment de la peça.

- F_{rk} : força per sobre de la qual la peça s'esquinça degut a l'esforç a torsió.
- F_{rm} : força màxima que pot proporcionar la màquina.
- F_{rq} : força per la qual es superarà l'angle de torsió admissible.
- F_{rx} : component de la força a l'espai en l'eix x.
- F_{ry} : component de la força a l'espai en l'eix y.
- F_{rz} : component de la força a l'espai en l'eix z.
- f_{smax} : velocitat màxima admissible per garantir l'acabat superficial.
- f_{tmax} : velocitat d'avanç màxima. (restriccions tecnològiques)
- f_{tmin} : velocitat d'avanç mínima. (restriccions tecnològiques)
- F_{tt} : força per sobre de la qual es doblegarà el suport de l'eina.
- f_{umax} : límit superior per a la velocitat d'avanç. (altres restriccions)
- f_{umin} : límit inferior per a la velocitat d'avanç. (altres restriccions)
- f_{vmin} : límit inferior per la velocitat d'avanç. (restriccions de la màquina)
- F_z : força assolida en el procés de tornejat.
- h : alçada de la rugositat entre pic i vall.
- I : inèrcia d'una secció.
- K_r : angle de posició principal.
- K_r' : angle de posició secundari.
- L : longitud de la peça.
- M : $r^{-0,714} \cdot BHN^{-0,323}$
- n : nombre de passades de desbast.
- p_1 : profunditat de passada a adoptar en les n-1 primeres passades.
- p_2 : profunditat de passada a adoptar a l'avantpenúltima passada.
- PG : gruix que resta per mecanitzar tenint en compte la profunditat de passada d'acabat.
- r : radi de punta de l'eina.
- R_a : rugositat superficial. Desviació aritmètica respecta la línia central avaluada.
- ρ_{acabat} : fletxa màxima generada per la pressió de l'eina sobre la peça admissible durant les passades d'acabat.
- $\rho_{desbast}$: fletxa màxima generada per la pressió de l'eina sobre la peça admissible durant les passades de desbast.
- R_t : alçada del pic més alt de la rugositat superficial.
- T : temps de tall.
- v : velocitat de tall.
- v_{vmax} : velocitat de tall màxima.