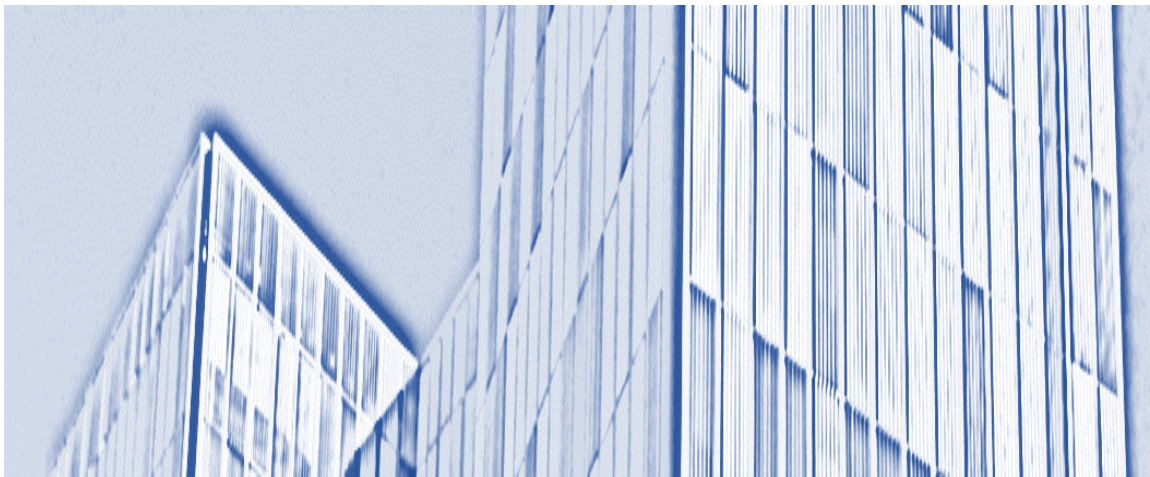


# TREBALL FI DE GRAU

**EN ENGINYERIA MECÀNICA**

**Títol: Anàlisi topològic dels efectes del brunyit amb bola  
assistit per vibracions ultrasòniques**



## **Memòria i Annexos**

**Autor: Josep Vicent López Miralles**

**Directors: Ramón Jerez Mesa & Antonio Travieso**

*convocatòria: octubre 2018*

## **RESUM**

En el present treball s'estudiaran els efectes del procés de brunyit amb bola assistit per vibracions ultrasòniques sobre l'acabat superficial en una peça UDIMET 720 (de base níquel reforçada amb tungstè i molibdè), amb una geometria cilíndrica amb tres superfícies de rugositats diferents. Es definiran 5 factors d'assaig, amb tres valors cada un, i després es farà un disseny d'experiment per establir quines condicions d'assaig hi haurà a cada procés.

S'han analitzat cinquanta-quatre empremtes amb un procés de brunyit amb vibració a una meitat, i un procés estàndard en l'altra, i després s'estudiarà la rugositat en cadascuna d'elles. Es prendran dades de la superfície amb i sense vibració, i es compararan els resultats amb els obtinguts en cada petjada. D'aquesta manera, es podrà determinar si hi ha una millora o no deguda al procés, quin percentatge i quins factors són els més influents sobre el resultat final.

Finalment, s'ha de determinar quines condicions o quins factors s'haurien de tenir en compte en funció dels resultats que es vulguin obtenir, de les propietats que es volen assolir sobre la peça en funció dels esforços a què hagi d'estar sotmesa o les condicions per obtenir un resultat el més versàtil possible.

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se estudiarán los efectos del proceso de bruñido con bola asistida por vibraciones ultrasónicas sobre el acabado superficial en una pieza UDIMET 720 (de base níquel reforzada con tungsteno y molibdeno), con una geometría cilíndrica con tres superficies de diferentes rugosidades. Se definen 5 factores de ensayo, con tres valores cada uno, y luego se hará un diseño de experimento para establecer qué condiciones de ensayo habrá en cada proceso.

Se han analizado cincuenta y cuatro huellas con un proceso de bruñido con vibración a una mitad, y un proceso estándar en la otra, y luego se examinará la rugosidad en cada una de ellas. Se tomarán datos de la superficie con y sin vibración, y se compararán los resultados con los obtenidos en cada huella. De este modo, se podrá determinar si hay una mejora o no debida al proceso, qué porcentaje y qué factores son los más influyentes sobre el resultado final.

Finalmente, se debe determinar qué condiciones o qué factores deberían tener en cuenta en función de los resultados que se quieran obtener, de las propiedades que se quieren alcanzar sobre la pieza en función de los esfuerzos a los que debe someterse o las condiciones para obtener un resultado lo más versátil posible.

## **ABSTRACT**

In the present work we will study the effects of the process of burnishing with ball assisted by ultrasonic vibrations on the surface finish in a piece UDIMET 720 (of nickel base reinforced with tungsten and molybdenum), with a cylindrical geometry with three different roughness. Five test factors will be defined, with three values each, and then an experimental design will be made to establish which test conditions will be in each process.

Fifty-four footprints have been analyzed with a burnishing process with vibration in one half, and a standard process in the other, and then roughness will be studied in all of them. Surface data will be taken with and without vibration, and the results will be compared with those obtained in each footprint. In this way, it will be possible to determine if there is an improvement or not due to the process, what percentage and what factors are the most influential on the final result.

Finally, it must be determined what conditions or what factors should be taken into account depending on the results that are to be obtained, the properties that are to be achieved on the piece depending on the efforts to which it must be subjected or the conditions for get a result as versatile as possible.

## AGRAÏMENTS

- *En primer lloc m'agradaria agrair al meu pare Pepe i a Isabel ja que m'han donat tota la força i suport per començar amb força aquest treball, no seria on sóc si no fos per ells.*
- *A la meva família i germans, especialment a Feliu, per donar-me la seva perspectiva d'un enginyer mecànic i donar-me tanta informació pràctica per evitar molts obstacles.*
- *A tots els meus amics del Garito'09 els agraeixo ser com són i això és suficient per fer-me sentir en ganes de tot.*
- *M'agradaria reconèixer una especial atenció als meus professors Ramon Jerez Mesa i Antonio Travieso per apostar per mi i tenir la paciència per encaminar i poder realitzar aquest treball dins dels terminis marcats. La seva simpatia i dedicació s'agraeixen quan el camí es fa costa amunt.*
- *Donar les gràcies a la meva mare, que ja no està entre nosaltres, però estic segur que s'alegraria molt veure tot el que m'he convertit.*

# ÍNDEX

## Contenido

<b>RESUM</b> .....	2
<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>AGRAÏMENTS</b> .....	5
<b>ÍNDEX</b> .....	6
<b>1. PREFACI</b> .....	7
<b>1.1. Origen del treball</b> .....	7
<b>1.2. Motivació</b> .....	7
<b>1.3. Requeriments previs</b> .....	8
<b>2. INTRODUCCIÓ</b> .....	9
<b>2.1. Objectius del treball</b> .....	12
<b>2.2. Abast del treball</b> .....	12
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	14
<b>3.1. Anàlisi del brunyit</b> .....	14
<b>4. ANÀLISI DELS RESULTATS</b> .....	19
<b>4.1. Rugositat. Anàlisi gràfica univariada i bivariada</b> .....	19
<b>4.1.1 - Paràmetres Sa i Sq</b> .....	19
<b>4.1.2 - Paràmetres Ssk i Sku</b> .....	21
<b>4.1.3 - Paràmetre S10z</b> .....	26
<b>4.2. Rugositat. anàlisi ANOVA</b> .....	29
<b>4.2.1. Gràfiques de tensions principals</b> .....	29
<b>Conclusions</b> .....	43
<b>Bibliografia</b> .....	44
<b>Annex A1. Resultats de les empremtes</b> .....	45
<b>Annex A2. Superfícies 3D</b> .....	46
<b>Annex A3. Càlculs ANOVA per a cada variable</b> .....	73

## 1. PREFACI

### 1.1. Origen del treball

El treball té el seu origen en estudis previs sobre el mètode de brunyit. Es basa en estudis anteriors duts a terme pel grup de recerca DEFAM, que tracten sobre el mètode de brunyit amb bola. Més en concret, aquest treball permet donar continuïtat a una línia d'investigació mitjançant la qual s'estudia i es determinen les condicions més convenients per a la reducció de la rugositat superficial en dos materials, l'acer i l'alumini.

Així, partint dels conceptes teòrics, els resultats i conclusions extretes experimentalment en treballs anteriors sobre passades simples de brunyit, s'estudiarà el resultat de realitzar una segona passada sobre la mateixa superfície que la primera, els seus pros i contres, i les millors condicions per un resultat òptim dins el rang de paràmetres inclosos en l'estudi.

### 1.2. Motivació

És important tenir en compte els diferents tipus de processos existents al mercat per poder elaborar un disseny factible, tant en termes de fabricació com econòmics, i cal conèixer el disseny per entendre el procés de fabricació.

Partint d'aquí, em sembla molt interessant conèixer un sistema d'acabat superficial que s'havia après durant la carrera de manera més profunda i analítica. És cert que sempre s'ha estudiat més el torn i la fresa, i és precisament aquest fet el que ha decidit la balança en quant a tot el món del brunyit i lo relacionat amb aquest procés.

La diferència bàsica entre aquest últim i els anteriors és el mètode mitjançant el qual s'aconsegueix millorar la superfície del material no és per arrencada de material sinó per deformació. Un concepte simple d'entendre, però complex d'aplicar, i que gràcies a aquest projecte vaig a conèixer amb més profunditat.

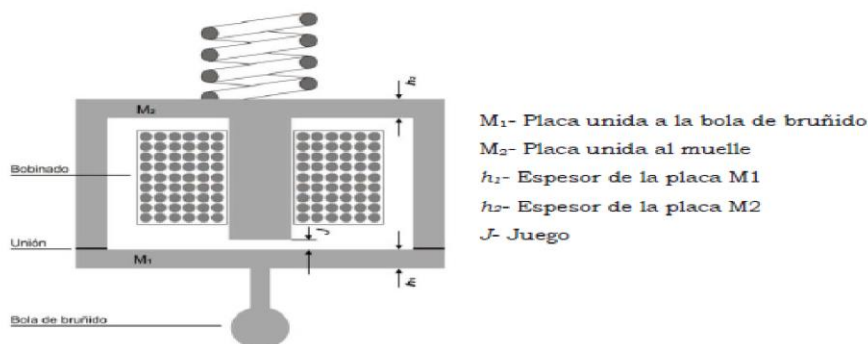
### 1.3. Requeriments previs

El procés de brunyit és molt antic, però les tècniques i els elements abrasius s'han desenvolupat d'una manera tan substancial que actualment el brunyit és un procés ràpid d'extracció comparable, i en molts casos més efectiu que el rectificat intern i capaç de produir productes d'una gran precisió. El brunyit ha demostrat ser un procés molt econòmic en multitud d'aplicacions en pràcticament totes les branques de l'enginyeria, i és adequat per a volums de producció des d'una unitat a milers. També s'adequa a la majoria de metalls o materials no metàl·lics usats en enginyeria.

El brunyit s'ha comparat sovint amb el rectificat intern, ja que tots dos processos persegueixen una gran precisió i un acabat de superfície específic, encara que la seva metodologia difereix en alguns aspectes. El rectificat normalment implica una roda abrasiva que gira a velocitats relativament altes, el que provoca un gran impacte de xoc sobre la peça, normalment sobre la línia de contacte.

Primerament s'explicarà l'eina que s'utilitza per brunyir les peces i els mètodes d'anàlisi que es fan amb aquesta.

El brunyit amb bola és un procés de treball en fred sobre la superfície del material que, mitjançant deformació plàstica, aconsegueix regularitzar i crear un efecte triple sobre ella. D'una banda, augmentar la duresa superficial i millorar la rugositat, i d'altra generem tensions residuals que es propaguen per la superfície interna del material.



**Figura 1.1. Esquema de funcionament del sistema de vibració d'alta freqüència [1].**



## 2. INTRODUCCIÓ

En la indústria actual hi ha una gran quantitat de components metàl·lics que requereixen d'un bon acabat superficial i d'una alta resistència, per poder garantir el seu funcionament òptim. Components mecànics de màquines-eina, automòbils, avions, trens, vaixells, motlles, matrius de conformació, i molts altres elements industrials; poden ser alguns exemples clars de peces que s'han d'ajustar a una bona rugositat superficial, una tolerància geomètrica concreta, un grau de duresa superficial elevat, uns valors de resistència mecànica considerables i una resistència a canvis de temperatures extremes per poder fer front a fenòmens com la fatiga.

Un exemple digne d'esmentar és el col·lapse del pont ferroviari de Chester (Anglaterra) el 1847, mostrat a la Figura 2.1. Va ser dels primers grans casos de trencament per fatiga de la història. Les vies del tren es van deformar i finalment trencar encara que podien resistir significativament més càrrega que la dels trens que passaven per sobre. A partir d'aquesta investigació es van adonar que aquest fenomen és un factor molt important a tenir en compte a l'hora de construir estructures de tota mena.

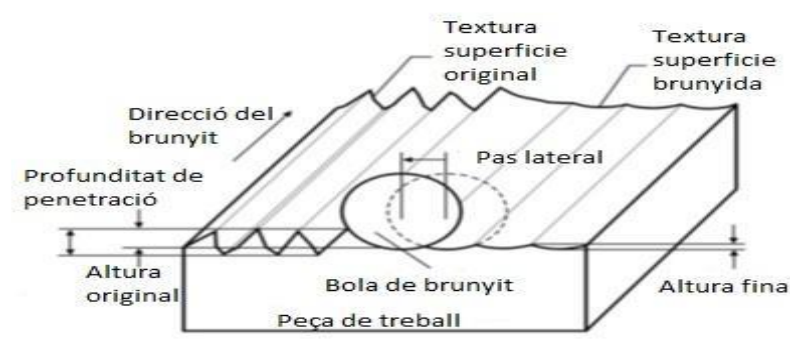


**Figura 2.1.- Il·lustració del col·lapse del tren de Chester [8].**

En els últims anys ha augmentat notòriament la quantitat d'investigació associada als diferents processos capaços de deixar en aquestes peces, les característiques adequades perquè poder complir satisfactòriament amb les seves prestacions.

Aquests reptes vinculats al final, no només són bàsics per al desenvolupament òptim de la indústria manufacturera dels nostres dies, però també aporten solucions concretes per a l'allargament de la vida útil de molts components que es sotmeten diàriament, per exemple, a altes taxes de tensió, o l'efecte de forces cícliques. A dia d'avui es compta amb un procés capaç de resoldre amb èxit moltes d'aquestes necessitats: el brunyit amb bola.

El brunyit amb bola es defineix com una operació tecnològica que consisteix a deformar plàsticament les irregularitats d'una superfície, per l'acció de la força exercida per una bola. Pot ser utilitzat per optimitzar l'acabat en superfícies cilíndriques, superfícies frontals planes, superfícies de forma o perfilades, superfícies còniques, bisell, respatllers, canvis de secció i ràdios, entre d'altres; que han estat prèviament mecanitzades (Travieso-Rodríguez, JA, 2011) [3]. A la Figura 2.2, es mostra una esquematzació d'aquest procés.



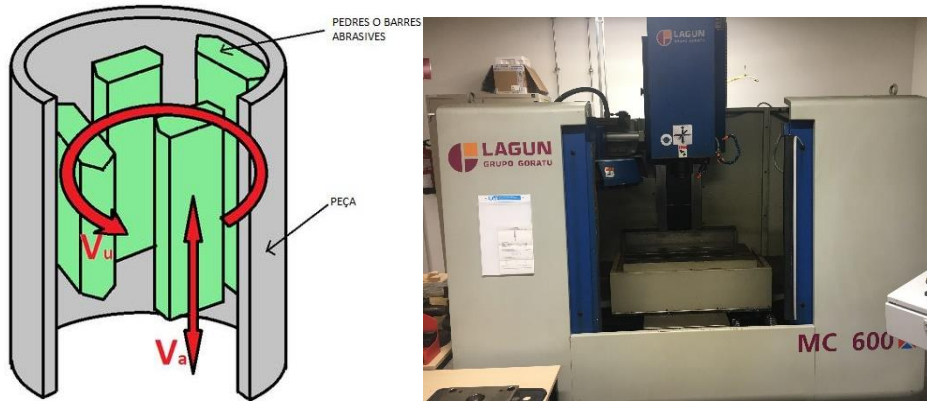
**Figura 2.2.- Diagrama esquemàtic del procés de brunyit amb bola [3].**

A partir d'aquesta idea sorgeix la necessitat de realitzar aquest estudi que abastarà des de la realització de totes les empremtes de la peça objectiu. Per realitzar els assajos s'ha assignat un material molt utilitzat en la indústria aeronàutica anomenat UDIMET 720, les característiques estan explicades en detall en el punt 3.1. Els resultats serviran per verificar si el brunyit amb vibració mostra avantatges respecte al seu homòleg convencional.

L'eina utilitzada per a brunyir la peça objectiu del treball (Figura 2.4) és la versió posterior d'un precedent anomenat brunyidor de bobinatge interior (Figura 2.3). L'eina consisteix en una fresadora MC 600 amb control numèric i un mandrí de diàmetre graduable i proveït de pedres abrasives denominat brunyidor. Cal col·locar-lo de forma

coaxial per mitjà d'un capçal pendular. Al brunyir es produeixen dos moviments que es solapen:

- 1- Moviment giratori de l'eina brunyidora [ $V_u$ ]. Velocitat: 15-90 m/min.
- 2- Moviment lineal (de puja i baixa) de l'eina brunyidora [ $V_a$ ].



**Figura 2.3 (Esquerra). Esquema de brunyidor de bobinatge interior.**  
**Figura 2.4 (Dreta). Fotografia de la brunyida MC 600 utilitzada per al procés.**

Aquest interès per optimitzar el procés convencional sorgeix de la necessitat explícita que té la indústria d'afegir valor als avantatges generals més evidents del brunyit amb bola, entre les quals caldria esmentar que:

- 1) Permet disminuir les asprors produïdes pels mecanitzats previs sense necessitat de realitzar un nou arrencada de material.
- 2) És un procés automatitzat que es pot dur a terme en la pròpia màquina en la qual s'ha mecanitzat la peça.
- 3) Incrementa la duresa superficial de manera significativa, millorant el coeficient de fricció, i en conseqüència, la resistència al desgast.
- 4) Aporta tensions residuals de tipus compressives, que augmenten la vida útil a fatiga dels materials tractats.

Moltes de les empreses que s'encarreguen de fabricar eines d'acabat per a una gran quantitat de superfícies irregulars, tant interiors com exteriors, comencen a controlar amb cert rigor no només la qualitat de les superfícies que es mecanitzen pel que fa a rugositat superficial, sinó també amb respecte a les micro-dureses i les tensions residuals compressives que deixen aquests processos sobre superfícies de materials diversos.

Controlar aquestes propietats s'ha convertit en una demanda creixent del mercat, interessat en la utilització de tots els recursos capaços d'allargar la vida dels components industrials sotmesos a alts esforços (Travieso-Rodríguez, JA, 2011) [3].

## **2.1. Objectius del treball**

Per a la realització d'aquest projecte es van traçar els següents objectius:

- **Objectiu general**

Estudiar la influència del brunyit amb vibració sobre diferents superfícies d'una peça d'UDIMET 720, mecanitzada prèviament amb una fresa hemisfèrica, i definint el grup de condicions òptimes de procés.

- **Objectius específics**

1. Preparar una proveta de UDIMET 720 prèviament mecanitzat amb una fresa hemisfèrica.
2. Analitzar 54 assajos experimentals amb un perfilòmetre òptic, per a la valoració dels resultats del procés de brunyit assistit amb vibracions en comparació amb els del brunyit convencional, i recomanar els valors dels paràmetres tecnològics a utilitzar.
3. Sintetitzar les dades obtingudes en el pas anterior per a poder veure el comportament de forma gràfica i clara.
4. Realitzar un anàlisi estadístic per poder treure conclusions sobre quines són les condicions òptimes de la passada.

## **2.2. Abast del treball**

Hi ha gran quantitat de documentació que demostra l'interès pel desenvolupament de mètodes analítics, empírics, numèrics i experimentals per predir el comportament de la deformació plàstica dels metalls sotmesos a forces externes en general, i a la produïda pel procés de brunyit en particular. Les aportacions que es pretenen realitzar en aquest treball, es podrien resumir de la següent manera:

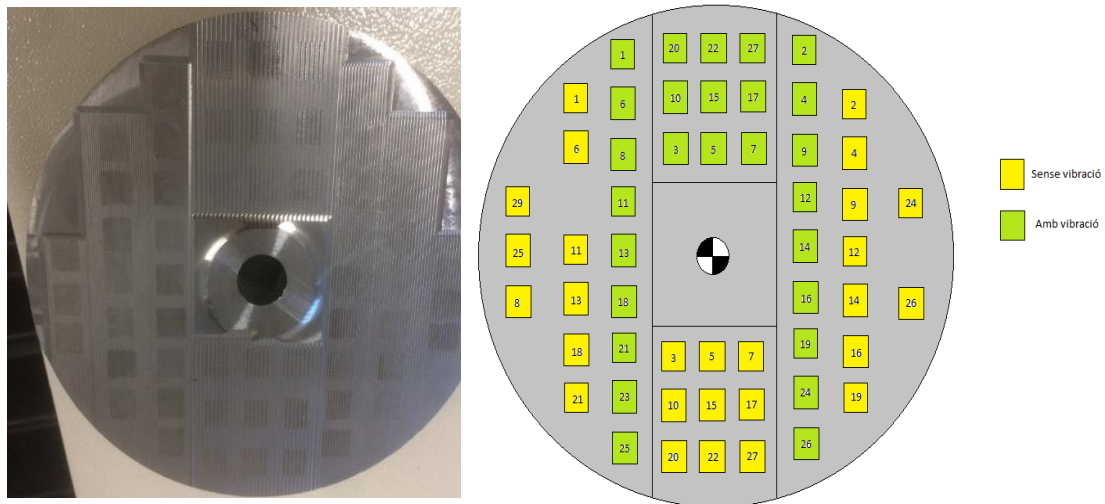
- S'investiga la naturalesa prèvia sobre la peça objectiu, els tractaments previs, les característiques del material i aspectes generals a tenir en compte.
- Es realitza un pla d'estudi per a organitzar pas a pas la metodologia del procés a seguir.

- S'analitzen totes les petjades existents a la superfície de la peça objectiu, mitjançant un perfilòmetre òptic 3D per a treure tota la informació necessària de la seva naturalesa per al seu posterior anàlisi i tractament de dades.
- S'agrupen tots els resultats obtinguts de forma que es puguin veure ordenats i estructurats de forma que es puguin operar amb ells seguint un criteri determinat.
- Es crea un model de Taguchi per agrupar totes les interaccions entre els assajos de la forma més eficient possible.
- Amb el programa de software estadístic Minitab, s'observa el comportament dels resultats obtinguts i quins patrons segueixen per a saber quins factors són els influents per a les respostes obtingudes sobre cada petjada.
- Es realitza el pressupost del procés per a valorar el projecte des d'un punt de vista econòmic
- S'elaboren conclusions sobre les condicions òptimes de procés.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Anàlisi del brunyit

En una investigació prèvia es van realitzar el brunyit de 54 empremtes diferents sobre 3 superfícies amb rugositats diferents entre elles, a una peça UDIMET 720 de 117mm de diàmetre. La distribució de les provetes dependrà de la zona on es trobi, però s'ha buscat optimitzar al màxim la superfície donada la geografia circular amb empremtes quadrades. A la figura 3.1 es pot veure la distribució exacta de totes les petjades i la numeració:



**Figura 3.1. Peça UDIMET 720 amb les 54 empremtes brunyides. (Dreta)**

**Esquema de la peça UDIMET 720 amb la distribució de les empremtes. (Esquerra)**

Cada petjada tindrà una mesura de 10x10 mm, amb la distribució que es pot observar a la Figura 3.1. Aquest procés de brunyit consta de dues parts:

**Part I:** Es brunyeix primerament la superfície, amb direcció preferent del brunyit cap a la coordenada I, amb uns paràmetres d'assaig inicials i un procés de vibració assistida. Aquest brunyit no serà el mateix per a totes les peces, ja es pot veure que té tres superfícies diferents començant per l'esquerra, seguint la dreta i acabant pel mig.

**Part II:** Es brunyeix cada petjada individualment i amb uns paràmetres diferents:

- **F (N)**
- **n (passades)**
- **Vf (mm/min)**
- **S0 (superfície)**
- **S (estratègia)**

**Part III:** S'analitzen aquestes petjades amb un perfilòmetre òptic 3D MICROMESURE 2 (Figura 3.2) per extreure tots els resultats necessaris per al seu posterior anàlisi.



**Figura 3.2. Fotografia del perfilòmetre òptic 3D MICROMESURE 2**

### **3.2. Material a tractar**

L'aliatge UDIMET 720 és un aliatge en base de níquel, sòlida solució reforçada amb tungstè i molibdè i endurit per precipitació amb titani i alumini. L'aliatge combina una alta resistència amb estabilitat metal·lúrgica amb una excel·lent retenció de la força d'impacte després de llargues exposicions a temperatures elevades. Té una bona oxidació i corrosió combinada amb alta resistència que el converteix en un aliatge útil en fabricacions d'àleps i discos de turbina de gas. Les propietats d'aquest aliatge, com la seva composició, propietats físiques i tèrmiques es troben a la Taula 3.1:

<b>PROPIETATS FÍSQUES</b>	<b>RESULTAT</b>
Densitat (g/cm <sup>3</sup> )	8.08
Interval de fusió (°C)	1194-1338
Coefficient d'expansió tèrmica (93°C, μm/m·°C)	12.24
<b>COMPOSICIÓ QUÍMICA</b>	
Crom (%)	15.5-16.5
Cobalt (%)	14-15.5
Molibdè (%)	2.75-3.25
Tungstè (%)	1-1.5
Titani (%)	4.75-5.25
Alumini (%)	2.25-2.75
Carboni (%)	12.01-12.02
Zirconi (%)	0.025-0.05
Bor (%)	12.01-12.02
Níquel (%)	55.16-59.705

**Taula 3.1. Composició del material [5]**

En relació al forjat, es pot fer fàcilment ja que és un material dúctil. Durant el procés de formació s'ha d'utilitzar un equip potent juntament amb lubricants pesats durant el procés de conformat en fred d'aquest aliatge. L'UDIMET 720 es pot mecanitzar mitjançant mètodes de mecanitzat convencionals i conté més qualitats de força,

viscositat i de treball. L'enduriment de l'aliatge abans del procés de tall es pot minimitzar mitjançant eines i un equip de mecanitzat pesat.

### **3.3. Factors de l'anàlisi**

La definició de les accions d'interès juntament amb els nivells seran objecte d'estudi necessaris per elaborar la matriu experimental, així com els graus de llibertat que seran coberts pels resultats. S'estableixen cinc factors diferents com a objecte d'estudi. Han estat elegits a la vista de l'anàlisi de resultats anteriors. Aquests paràmetres seran exposats a continuació:

- **Topologia de la superfície original (S0):** Aquest paràmetre correspon a la textura superficial inicial. És molt interessant la influència del brunyit en la superfície objectiu ja que es pot associar l'efectivitat del procés a un grau d'assoliment aconseguit a través de la mecanització. La superfície serà mecanitzada amb un fresat hemisfèric. Com la peça objectiu té tres rugositats diferents hem definit que la superfície més fina, és a dir l'esquerra, serà la número 1. La segueix la part dreta (2) i definim com a tercera i última superfície a la més rugosa, la del mig.
- **Força de precàrrega (Fp):** La força de brunyit  $F_p$  és el controlador físic que descriu la interacció entre la bola brunyidora i la superfície objectiu. Aquesta força és el resultat d'una superposició d'una força oscil·lant  $F_V$  provinent d'una precàrrega. Aquesta precàrrega es pot canviar a través del motlle de compressió, mentre que el valor de  $F_V$  és constant independentment de la càrrega. Amb la força de referència de 150 N, estudiarem el cas de 2 múltiples superiors d'aquesta força per estudiar l'efecte de forces majors aplicades. Prendrem valors de 300 i 450 N.
- **Nombre de passades (n):** És el total d'iteracions successives realitzades durant el brunyit. Partint de la hipòtesi que la interacció entre la bola del brunyit i la superfície idealment s'interpreta com una línia, aquest paràmetre representa el nombre de vegades que aquesta línia es rastreja en aquesta posició. Per tant, com més gran sigui el valor del paràmetre, més deformació plàstica obtindrà. Partim d'una situació inicial d'una passada, i augmentarem a 3 i 5 per a la segona i tercera passada, respectivament. No s'ha de confondre aquest valor amb el nombre de línies necessàries per a cobrir tota la superfície, ja que aquí també intervindrà el factor lateral entre diferents passades.



- **Velocitat de pas ( $V_f$ ):** Aquesta és la velocitat lineal a la que l'eina recorre la superfície. Aquest paràmetre s'ha d'expressar amb mm/min ja que estem parlant d'una operació de fresat. Partim d'una velocitat de referència de 300 mil·límetres per minut, així que aplicarem uns valors de  $2V_f$  i  $3V_f$  per les condicions conseqüents.
- **Estratègia (S):** Aquest paràmetre descriu la trajectòria seguida pel brunyit de la bola per cobrir tota la superfície objectiu  $n$  vegades. Les primeres passades es realitzen en tots els casos perpendiculars a la direcció de fresat inicial, d'aquí la seva denominació com a adreça principal de brunyit. les estratègies "0" es contempen sempre al llarg d'aquesta direcció, "0" que denota cap canvi angular en la trajectòria entre passades. L'estratègia "90/0" es basa en convertir alternativament  $\pm 90$  graus la direcció del brunyit entre una passada i la següent. Quant a l'ordre relatiu entre desplaçament lateral i nombre de passades, les estratègies "bn" cobreixen  $np$  vegades l'objectiu complet, mentre que l'estratègia "nb" es realitza passant  $np$  vegades una línia, i després prenent la passada lateral fins a cobrir l'objectiu complet. En triar aquestes tres estratègies, s'ha de detectar la influència eventual de la direcció durant el brunyit, així com els efectes de passar repetidament en la mateixa ruta de brunyit. La combinació de diferents S parells origina diversos patrons de brunyit en la matriu experimental.

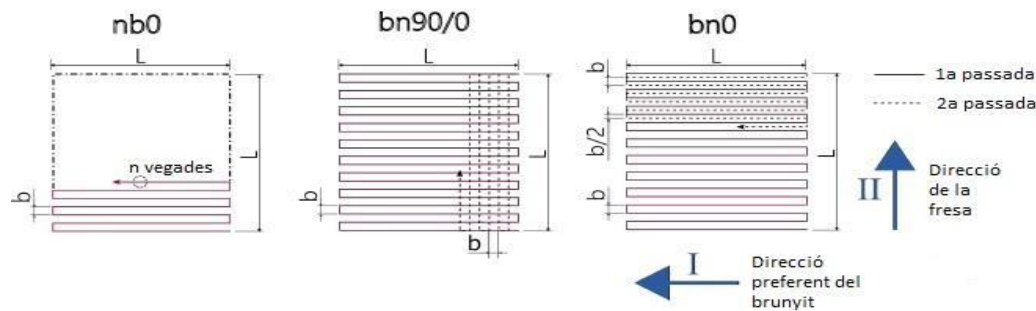


Figura 3.3. Estratègies del brunyit de forma gràfica [7]

FACTORS		NIVELLS		
		1	2	3
A	S0	1	2	3
B	F (N)	150	300	450
C	n	1	3	5
D	$V_f$ (mm/min)	300	600	900
I	S	nb0	bn90/0	bn0

Taula 3.2. Factors d'anàlisi i els seus nivells.

### 3.4. Mètode Taguchi

El mètode Taguchi consisteix en una estratègia d'experimentació durant l'etapa de disseny mitjançant la qual es determinen els nivells dels factors de disseny que permeten obtenir productes amb la menor variabilitat possible i amb les seves característiques de qualitat el més properes al valor nominal desitjat.

És un sistema enfocat a la qualitat en enginyeria i basat en l'estadística, en què s'estudien els factors que influeixen en el producte final, diferenciant entre els factors de control i els factors de soroll. Els primers són els que es poden controlar o variar i els segons són factors que influeixen en el resultat, però no és possible la seva alteració o modificació.

Amb el sistema de factors que hem definit abans, hauríem de realitzar 3<sup>5</sup> assajos per cobrir totes les interaccions entre els cinc factors que determinen el resultat final. Hi ha un sistema que et pot estalviar els 243 assajos i és el mètode Taguchi.

Aquest sistema crea una estructura d'interaccions entre els cinc factors determinants, que permet que amb una matriu puguis abastar una mostra significant per a l'abast d'aquest projecte.

A continuació es mostrarà la distribució dels factors que han influït en l'estudi amb una taula L27 per veure la seva posterior anàlisi i si aquests estan correlacionats entre ells:

	F (N)	n (passades)	Vf (mm/min)	S0 (superfície)	S (estratègia)
1	150	1	300	1	nb0
2	150	1	600	2	bn90/0
3	150	1	900	3	bn0
4	150	3	300	2	bn0
5	150	3	600	3	nb0
6	150	3	900	1	bn90/0
7	150	5	300	3	bn90/0
8	150	5	600	1	bn0
9	150	5	900	2	nb0
10	300	1	300	3	bn90/0
11	300	1	600	1	bn0
12	300	1	900	2	nb0
13	300	3	300	1	nb0
14	300	3	600	2	bn90/0
15	300	3	900	3	bn0
16	300	5	300	2	bn0
17	300	5	600	3	nb0
18	300	5	900	1	bn90/0

19	450	1	300	2	bn0
20	450	1	600	3	nb0
21	450	1	900	1	bn90/0
22	450	3	300	3	bn90/0
23	450	3	600	1	bn0
24	450	3	900	2	nb0
25	450	5	300	1	nb0
26	450	5	600	2	bn90/0
27	450	5	900	3	bn0

**Taula 3.3- Taula de distribució Taguchi.**

## 4. ANÀLISI DELS RESULTATS

En aquest epígraf es realitzarà un anàlisi dels resultats obtinguts en els estudis anteriors tenint en compte els paràmetres mesurats en l'apartat anterior. Es realitzarà una anàlisi univariada, bivariada i multivariada dels mateixos per poder detectar tendències i establir conclusions que responguin als objectius plantejats inicialment.

### 4.1. Rugositat. Anàlisi gràfica univariada i bivariada

Per a l'estudi de rugositat s'ha utilitzat un rugosímetre. S'han analitzat cada una de les empremtes i ens hem centrat en quatre paràmetres superficials que són Sa, Sq, Ssk, Sku i S10z. A continuació definirem els cinc:

#### 4.1.1 - Paràmetres Sa i Sq

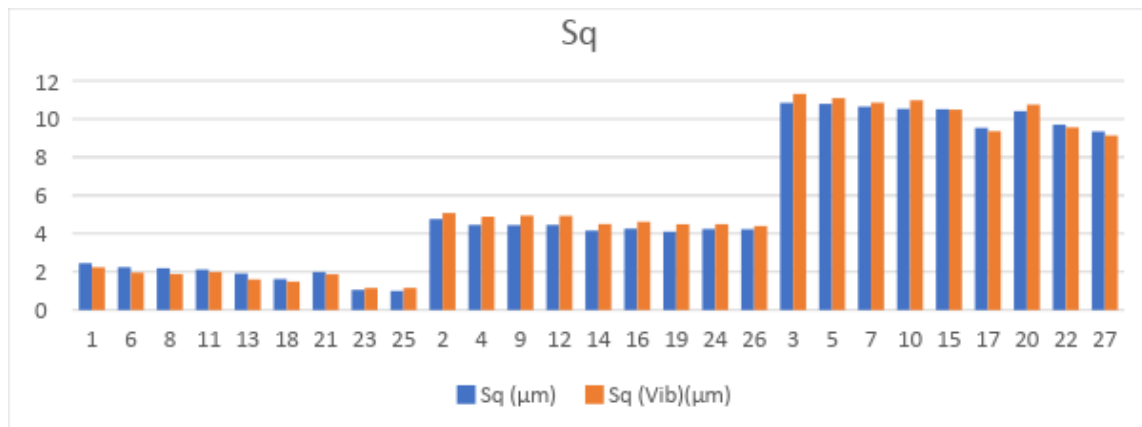
- **Sa** expressa la diferència d'alçada de cada punt en comparació amb la mitjana aritmètica de la superfície. Aquest paràmetre s'utilitza generalment per avaluar la rugositat superficial.
- **Sq** representa l'arrel de la mitjana dels valors al quadrat ordenats dins de l'àrea de definició. És equivalent a la desviació estàndard de les altures.

Aquests paràmetres representen una mesura global de la textura que comprèn la superfície. Ambdós són insensibles al diferenciar pics, valls i l'espaiat de les diverses característiques de textura. Per tant, poden ser enganyosos ja que moltes superfícies amb funcions de simetria espacial (Ex. Fresades vs. afilades) poden tenir el mateix valor als dos paràmetres, però funcionen de manera molt diferent. Es poden utilitzar per indicar desviacions significatives en les característiques de la textura.

El paràmetre Sq proporciona pràcticament la mateixa informació que Sa però el primer és lleugerament més sensible a pics alts i valls baixes, és per aquest motiu que a efectes pràctics s'operarà amb Sq, ja que la diferència en aquest estudi no marca una diferència significativa per l'anàlisi. Les fórmules [1] i [2] per calcular aquests paràmetres són les següents:

$S_a = \iint_a  Z(x, y)  dx dy$	[1]
$S_q = \sqrt{\iint_a (Z(x, y))^2 dx dy}$	[2]

Els resultats Sq de l'estudi de rugositat de la peça objectiu han sortit amb el següent patró:



**Figura 4.1.- Gràfic del comportament del paràmetre Sq en totes les empremtes.**

Com es pot veure, clarament es diferencien les tres superfícies inicials. També es pot apreciar dins de cada superfície que, al principi quan els paràmetres no són tan elevats els pics són més alts i, conforme es van aplicant valors més elevats dels paràmetres, la línia de cims descriu un pendent negatiu.

En el gràfic a continuació es pot observar la relació existent entre la topografia de la superfície original (S0) i la textura de la superfície Sq, detectant clarament la tendència a augmentar els valors de Sq a mesura que canvia la textura de la superfície original. En analitzar la correlació existent entre els dos paràmetres es pot observar segons la sortida

del Minitab que és elevat amb un p-valor zero de manera que les variables estan fortament correlacionades i de manera positiva.

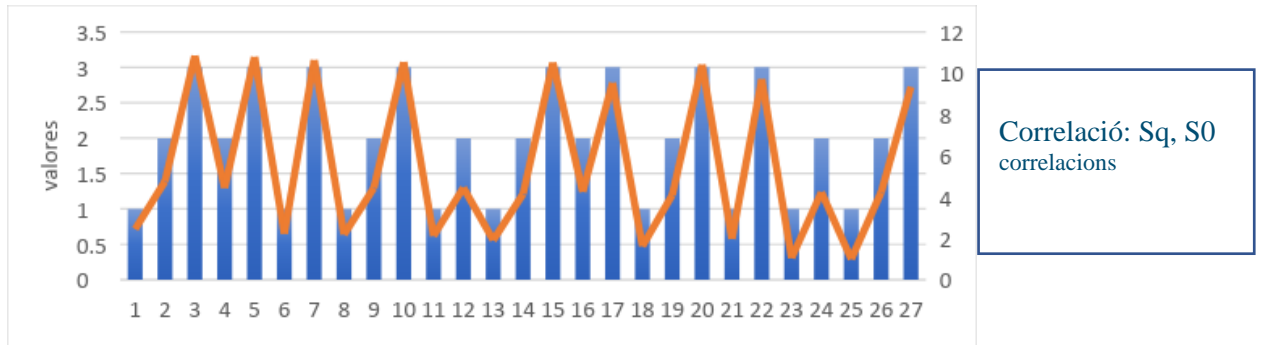


Figura 4.2. Gràfic que relaciona les variables S0 i Sq.

Realitzant un anàlisi sobre el comportament entre les variables Sq amb i sense vibració i la seva relació amb la topologia de la superfície, es pot observar que la tecnologia de brunyit aplicada amb vibració és menys dispersa encara que presenta un variabilitat molt més àmplia en les seves desviacions estàndard respecte la tecnologia de brunyit convencional per a un interval de confiança d'un 95%, de manera que es podria recomanar l'ús d'aquesta tecnologia per al brunyit de la superfície objecte d'estudi, però no es pot concloure degut a aquesta variabilitat existent.

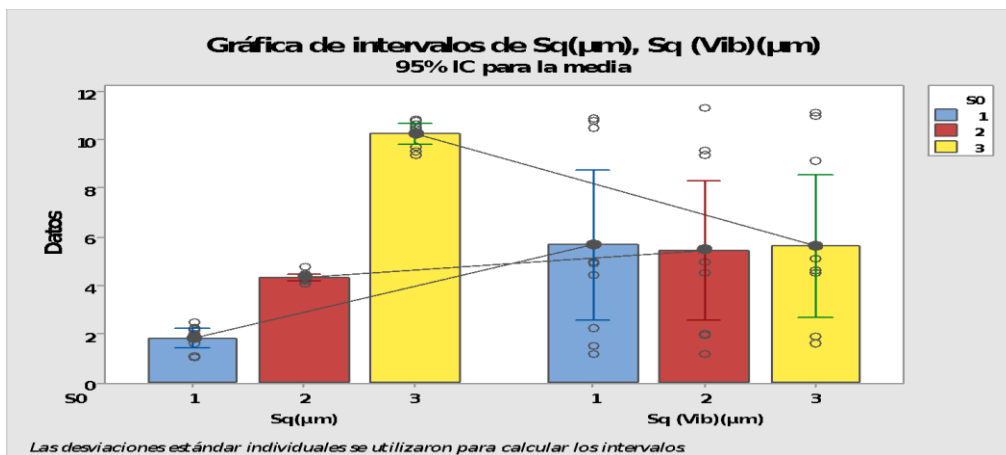


Figura 4.3.- Anàlisi de la variabilitat dels paràmetres Sq amb i sense vibració, i S0.

#### 4.1.2 - Paràmetres Ssk i Sku

- **Ssk** representa el grau de simetria de les altures de la superfície sobre el pla mitjà. El signe de Ssk indica el predomini de pics (és a dir,  $Ssk > 0$ ) o estructures de vall ( $Ssk < 0$ ) que comprenen la superfície.
- **Sku** indica la presència de pics desmesuradament alts / valls profundes ( $Sku > 3$ ) o la manca dels mateixos ( $Sku < 3$ ) que componen la textura. Si les altures de la

superfície estan distribuïdes normalment (és a dir, la corba de campana), llavors  $S_{sk}$  és 0 i  $S_{ku}$  és 3.

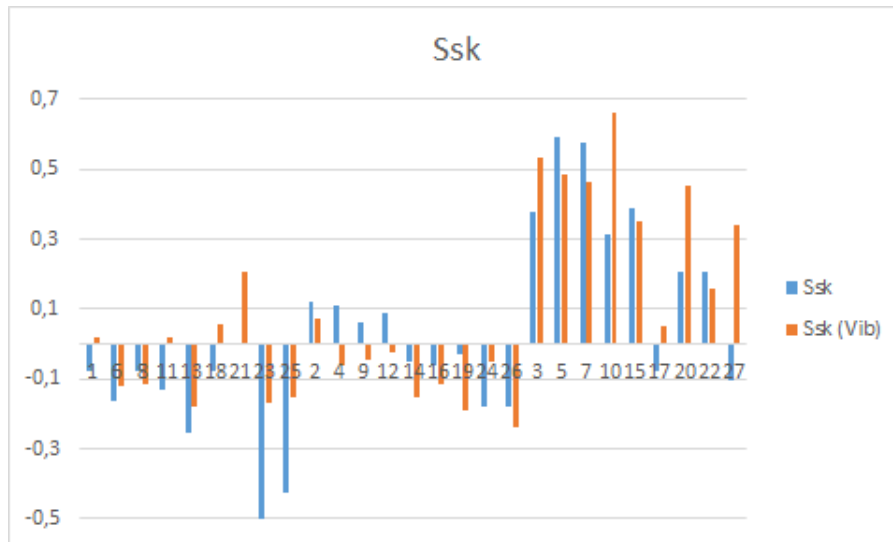
Les superfícies descrites com gradualment variables, lliure de puntes extremes o característiques de la vall, tendiran a tenir  $S_{ku} < 3$ .

**$S_{sk}$**  és útil per especificar superfícies polides i monitoritzar diferents tipus de condicions de desgast.  $S_{ku}$  és útil per indicar la presència de defectes de bec o vall que poden ocórrer en una superfície. Com  $S_{sk}$  i  $S_{ku}$  impliquen les potències d'ordre superior de les altures de la superfície, s'han de realitzar suficients mesuraments per proporcionar estadísticament valors significatius i/o seleccionar correctament el filtre de banda ampla per eliminar els erms de les valls o pics.

Les fórmules [3] i [4] per calcular aquests paràmetres són les següents:

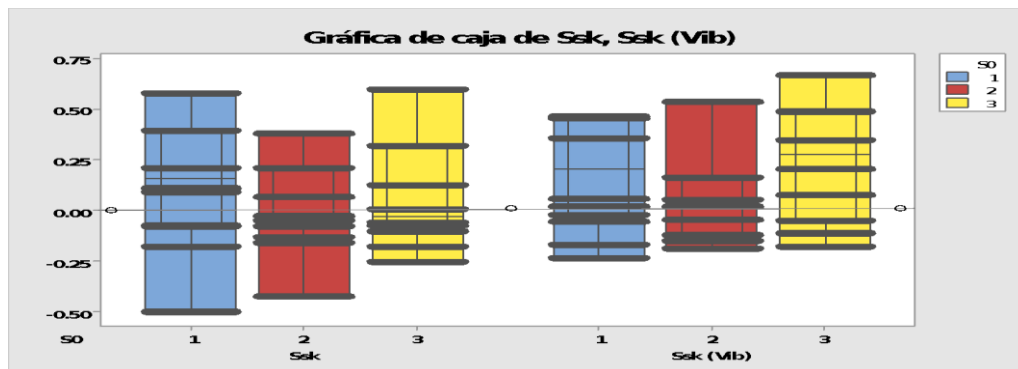
$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \iint_a (Z(x, y))^3 dx dy$	[3]
$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \iint_a (Z(x, y))^4 dx dy$	[4]

Els resultats de *skewness* ( $S_{sk}$ ) i *kurtosis* ( $S_{ku}$ ) fets a la prova de rugositat del laboratori són els mostrats a la figura 4.4, on trobem gran variabilitat entre els resultats per a les mostres preses aplicant els dos mètodes, el convencional i amb vibració assistida. Podem observar però, que els resultats tenen una escala més petita que els altres resultats, fet que vol dir que la superfície està bastant equilibrada entre valls i pics, encara que a la superfície es pot veure una petita predominança de pics.



**Figura 4.4.- Gràfic del comportament del paràmetre Ssk en totes les empremtes.**

Per aprofundir l'anàlisi o poder detectar la influència d'altres paràmetres sobre el grau de simetria de les altures de la superfície sobre el pla mitjà, es van realitzar altres diagrames de caixa múltiples, observant-se en la figura 4.5 el comportament del paràmetre Ssk, amb o sense vibració, pel que fa a la topografia de la superfície. Es pot apreciar clarament la major concentració de dades, per a les dues tecnologies es troba per sobre de zero, és a dir, fins i tot un predomini de pics sobre la superfície, trobant més pics en la mostra presa amb vibració. Per a ambdues tecnologies la superfície 3 és la que presenta més pics.



**Figura 4.5.- Gràfic caixa del paràmetre Ssk pel que fa a la superfície original.**

Per discriminar encara més i conèixer la influència de l'estratègia aplicada (trajectòria seguida pel brunyit) sobre les superfícies i el paràmetre Ssk, es va realitzar un altre diagrama de caixa multivariat. A la figura 4.6, es pot analitzar com és el comportament del grau de simetria sobre cadascuna de les superfícies i tenint en compte les estratègies traçades per al brunyit.

- En l'estratègia bn0 es pot apreciar que quan s'aplica el mètode convencional en cadascuna de les superfícies estudiades no s'observa cap patró de comportament per al paràmetre Ssk, evidenciant que per a la superfície 3, només es registren valls ja que tots els valors són negatius. En canvi, en aplicar el mètode amb vibració es pot observar que aproximadament el 75% dels valors són positius pel que hi ha un predomini de pics sobre la superfície.
- En l'estratègia bn90 / 0 es pot observar que els valors de Ssk a les superfícies 1 i 2 fluctuen entre positius i negatius, tot i que predominen els valors positius, és a dir, hi ha un predomini de pics sobre la superfície, en canvi en analitzar la superfície 3, per ambdós mètodes, amb i sense vibració, tots els valors de Ssk són positius pel que no hi ha presència de valls sobre aquesta.
- En l'estratègia nb0, a diferència de les altres, es pot veure com a la superfície 2, la majoria dels valors de Ssk són negatius per a tots dos mètodes aplicats, o sigui, amb i sense vibració, de manera que hi ha un predomini de valls sobre la superfície. A les superfícies 1 i 3, tot i que presenten valls perquè també registren valors negatius, es pot veure que la majoria de les dades són positives pel que el que predomina sobre les superfícies són els pics.

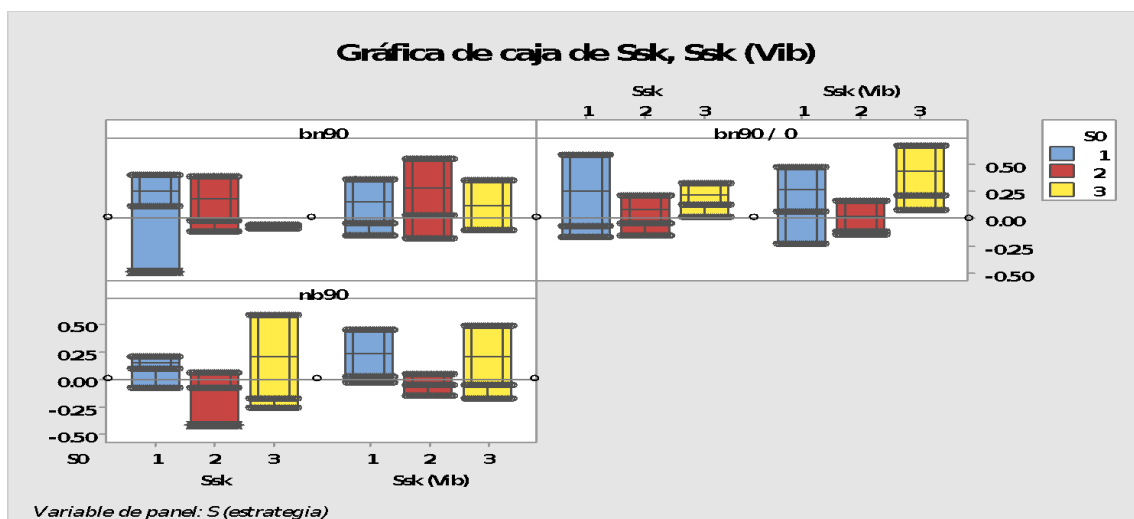
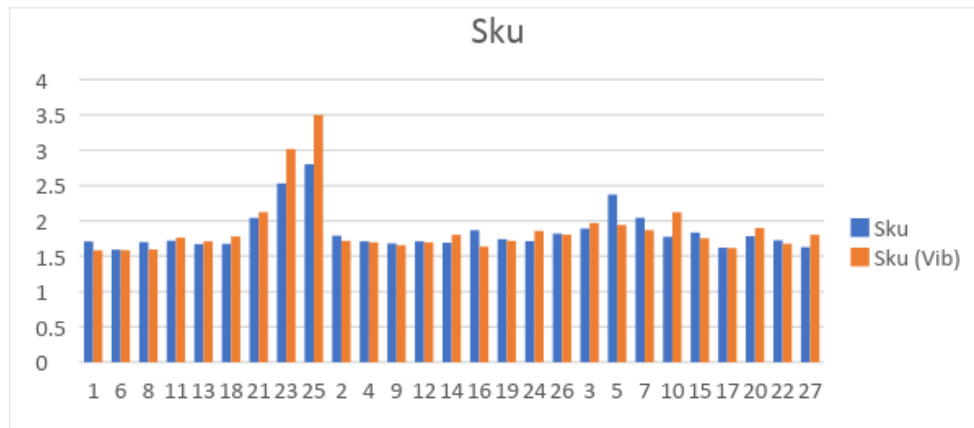


Figura 4.6.- Gràfic caixa del paràmetre Ssk respecte a la S0 i S.

- Per a la Ssk es pot observar un fet interessant i és que a la primera superfície S1 hi ha un predomini de valls, a la S2 en canvi s'observa una igualtat bastant equitativa amb un punt molt petit a favor de les valls. Finalment, s'observa que en la superfície més rugosa ha una gran predominança de pics. Un altre fet destacable és que els valors amb més pics gairebé sempre estan en les mesures amb vibració.



A continuació, s'analitza el paràmetre Sku, el qual indica la presència de pics desmesuradament alts / valls profundes o la manca dels mateixos que componen la textura. A la figura 4.7, es mostra la relació entre els valors presos amb tots dos mètodes, amb i sense vibració.



**Figura 4.7.- Gràfic del comportament del paràmetre SKU en totes les empremtes.**

Amb els valors anteriors es poden fer diverses valoracions, com les següents:

- En quant a la Sku es pot observar que en línies generals no hi ha una magnitud alta de pics o valls que sobresaltn la mitjana, encara que podem veure un petit repunt en la petjada 23 i 25, sobretot quan se li ha aplicat vibració. En general podem dir que la superfície és estable gairebé en totes les seves línies.

En els gràfics de la figura 4.8 es pot veure la variabilitat entre les dades de Sku tenint en compte la Superfície original, aplicant la tècnica normal i amb vibració. En analitzar les dades aplicant la tècnica tradicional, sense vibració, es pot veure que en cap de les superfícies estudiades es van presenciar pics elevats ni valls profundes; en canvi, en analitzar les dades de Sku aplicant la tècnica estudiada amb vibració, s'observen en les textures de les superfícies originals 1 i 2 la presència de valls profundes i pics molt elevats. Independentment del que s'ha observat es pot concloure que la majoria de les dades de Sku es troben concentrats entre 1.5 i 2.0.

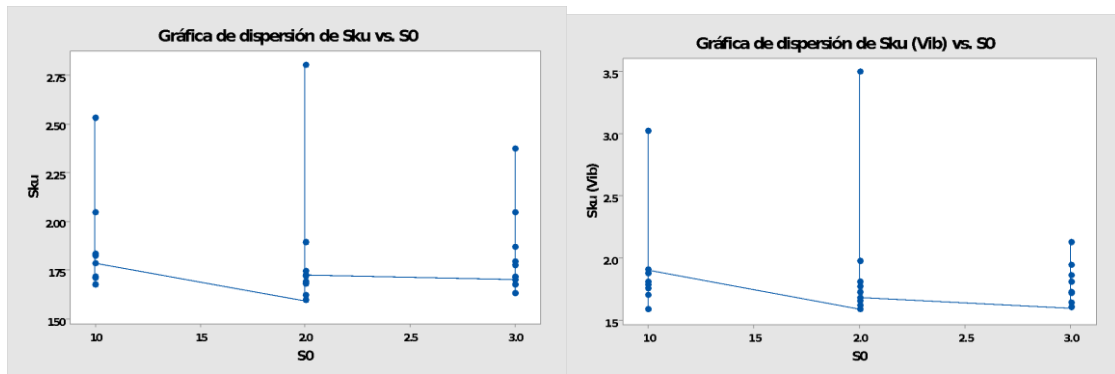


Figura 4.8.- Gràfic de dispersió entre SKU i la Superfície Original S0.

En realitzar una prova de normalitat per a les dades de Sku usant tots dos mètodes, amb i sense vibració, prenent un nivell de significació de 0.05, és a dir, per a un 95% de confiança, es pot observar a la figura 4.9, que el p valor és menor que el nivell de significació pel que es rebutja la hipòtesi nul·la que planteja que els mateixos no posseeixen distribució normal, això vol dir que la simetria està afectada i com la curtosi no és 3.00, les dades estan separades de la mitjana i per tant hi ha presència de valors atípics. Aquests valors són els causants de pics i valls en les superfícies.

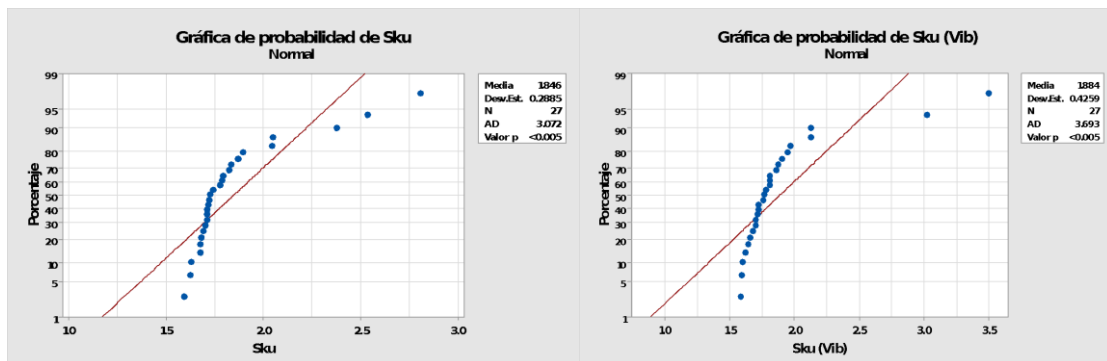


Figura 4.9. - Gràfic de probabilitat per Sku i Sku (Vib).

#### 4.1.3 - Paràmetre S10z

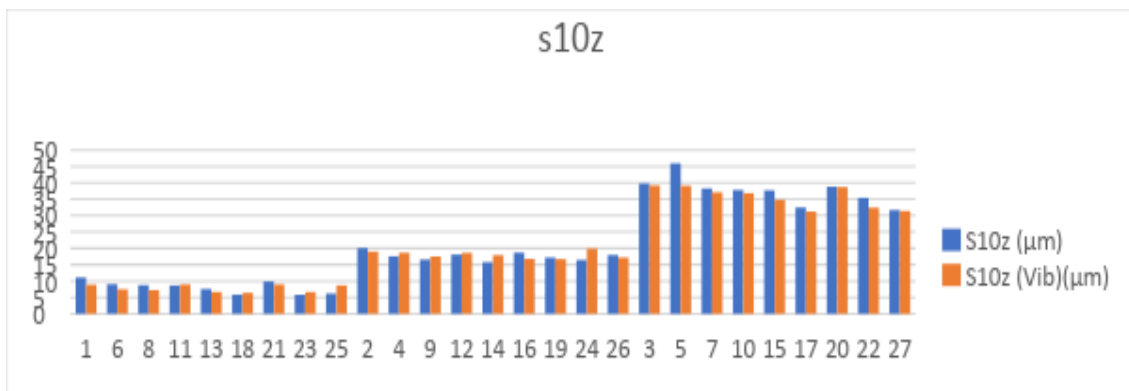
**S10z** és el paràmetre avaluat a partir dels 10 punts més alts i més baixos trobats en la superfície.

- **Sp**: L'alçada màxima (és l'altura del punt més alt).
- **Sv**: La profunditat màxima de la vall (és la profunditat del punt més baix, expressat com un nombre negatiu).
- **Sz**: És la màxima altura de la superfície i es troba des de:  $Sz = Sp - Sv$
- Per tant,  $S10z = S10p - S10v$ .

Com S10z es troba a partir de punts individuals, tendeix a donar com a resultat mesuraments irrepetibles. Per tant, quan s'utilitza aquest paràmetre, s'establiran adequadament els amplis de banda de filtre espacial per eliminar els pics / valls erronis i intervenir les mesures múltiples en ubicacions aleatòries al llarg de la mostra, per obtenir un resultat estadísticament significatiu.

Les aplicacions típiques per S10z poden incloure superfícies de segellat i aplicacions de recobriment. Sp pot trobar aplicació en considerar les superfícies que s'utilitzaran en una aplicació de contacte lliscant. Sv pot trobar aplicació quan les profunditats de les valls relacionades amb la retenció de fluids poden ser motiu de preocupació, com en els sistemes de lubricació i recobriment.

A la figura 4.10 s'observen els resultats de l'estudi d'aquest paràmetre:



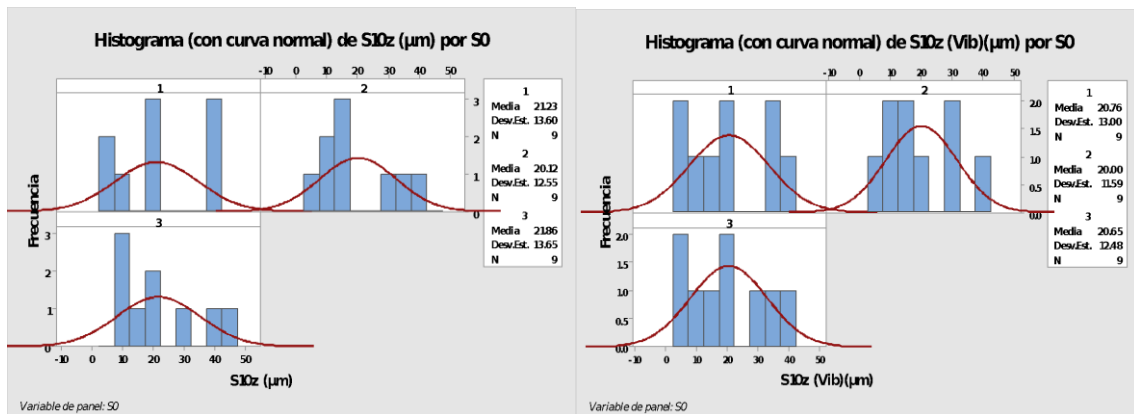
**Figura 4.10.- Gràfic del comportament del paràmetre S10z en totes les emprems.**

Per analitzar amb més profunditat el comportament de les dades preses sobre la variable S10z es va realitzar un estudi d'estadística descriptiva, mostrat a la figura 4.11, en la mateixa es pot observar que la topologia de la superfície original no té tanta influència sobre la variable S10z ja que el rang de variació de les dades és similar per a cadascuna de les superfícies estudiades, independentment de la tecnologia a aplicar. La desviació estàndard és elevada i això de deu fonamentalment a l'àmplia variabilitat entre les dades preses i la presència de valors extrems que s'allunyen àmpliament de la mitjana.

Estadístiques	S0	Mitja	Desv. Est.	Mínim	Q1	Mitjana	Q3	Màxim	Rang	Asimetria
S10z (µm)	1	21.23	13.60	5.83	8.48	17.95	37.97	38.81	32.98	0.41
	2	20.12	12.55	6.18	8.86	16.57	33.93	39.78	33.60	0.60
	3	21.86	13.65	7.57	9.32	18.66	34.73	45.92	38.35	0.75
S10z (Vib)(µm)	1	20.76	13.00	6.39	7.77	18.58	35.93	38.68	32.29	0.39
	2	20.00	11.59	7.49	8.83	17.48	31.80	39.17	31.68	0.57
	3	20.65	12.48	6.66	8.10	18.99	34.10	39.08	32.42	0.41

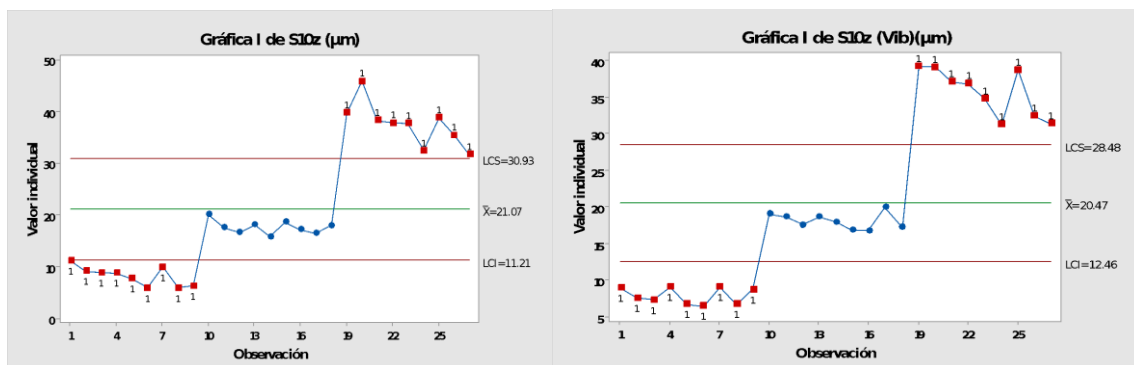
**Figura 4.11. - Estadística descriptiva de les variables S10z amb i sense vibració.**

En analitzar els histogrames de freqüències de la Figura 4.12 de forma general es pot veure la presència de penya-segats en les dades i asimetria, això pot donar-se fonamentalment perquè la mostra presa és petita pel que és possible que cada barra en l'histograma no contingui suficients punts de dades per mostrar exactament la distribució de les dades. A més, es poden veure corriments de les barres cap a la dreta o cap a l'esquerra, el que demostra que no segueixen una distribució normal. Tot aquest anàlisi permet concloure que quan més rugosa és la superfície, més elevats són els 10 cims més alts de la superfície analitzada.



**Figura 4.12. - Histograma de freqüència per a la variable S10z amb i sense vibració.**

El procés es troba fora de control estadístic, es pot notar en els gràfics de control individuals per les dades preses de S10z, sense i amb vibració, de la figura 4.13 que el comportament és similar independentment de la tecnologia utilitzada. A més, es pot notar clarament la presència de valors atípics elevats per sobre del límit de control superior, i molt petits que es troba per sota del límit de control inferior.



**Figura 4.13. - Gràfics de control Individual per a la variable S10z amb i sense vibració.**

## **4.2. Rugositat. anàlisi ANOVA**

Una anàlisi de variància (ANOVA) prova la hipòtesi que les mitjanes de dues o més poblacions són iguals. Els ANOVA avaluen la importància d'un o més factors en comparar les mitjanes de la variable de resposta en els diferents nivells dels factors. La hipòtesi nul·la estableix que totes les mitjanes de la població (mitjanes dels nivells dels factors) són iguals mentre que la hipòtesi alternativa estableix que almenys una és diferent.

Per analitzar la influència de tots els factors sobre les variables de resposta i la solidesa associada a ells, els resultats vinculats a una matriu experimental Taguchi es poden avaluar a través d'una tècnica d'anàlisi de variància (ANOVA). El propòsit de la ANOVA aplicat a l'anàlisi de disseny experimental, és comparar l'efecte dels factors individuals i les interaccions que s'apliquen simultàniament en la variable de resposta. Per tant, permet la diferenciació dels efectes de les accions d'interès de la variació residual, o soroll. La taula ANOVA lliura una jerarquia de la diferència de fonts de variació de la variable de resposta. Si tots els mitjans observats, és a dir, el resultat per a cada correguda, estan molt junts, llavors les diferències entre ells poden ser un tribut a la variació residual.

### **4.2.1. Gràfiques de tensions principals**

Es realitzaran les gràfiques d'efectes principals per examinar les diferències entre les mitjanes de nivell per a un o més factors de diverses variables respostes ja vistes en l'epígraf anterior. Es considera que hi ha un efecte principal quan diferents nivells d'un factor afecten la resposta de manera diferent. Una gràfica d'efectes principals gràfica la mitjana de respostes per a cada nivell de factor connectat per una línia.

#### **Variables a analitzar**

S'analitzarà el comportament de 4 respostes utilitzant tecnologia normal i amb vibració, tenint en compte 5 variables predictorres per analitzar l'existència d'efecte principal sobre les mateixes (Figura 4.16).

variables Resposta		Variables predictorres (Factors)					
		N I V E L L S	F	n	Vf	S0	S
			Força de precàrrega	Nombre de passades	Velocitat de pas	Topologia de la superfície original	Estratègia (Trajectòria del brunyit)
Sq	Sq (Vib)	I	150 N	1	300mm/min	1-Sup. fina	nb0
Ssk	Ssk (Vib)	II	300 N	3	600mm/min	2-Sup. mitjana	bn90/0
Sku	Sku (Vib)						
S10z	S10z (Vib)	III	450 N	5	900mm/min	3-Sup. rugosa	bn0

Figura 4.16. - Taula de dades de variables i factors a analitzar.

S'ha introduït la matriu Taguchi juntament amb els resultats superficials de les petjades per realitzar una anàlisi estadística i poder observar com afecta cada factor de l'assaig sobre la rugositat. S'han obtingut les següents gràfiques d'efectes principals:

**A) Anàlisi de la variable resposta Sq**

En analitzar la gràfica de la figura 4.17 relacionada amb els efectes principals per a la resposta Sq i les variables: F, n, Vf i S, la línia és gairebé horitzontal pel que es considera que no hi ha efecte principal, és a dir, cada nivell del factor afecta la resposta de la mateixa manera i la mitjana de resposta és la mateixa per a tots els nivells dels factors. En canvi, la variable S0 mostra que hi ha un efecte principal ja que la línia presenta una pendent pronunciada. Aquí s'evidencia clarament que, com més rugosa sigui la superfície, més augmenta Sq, és a dir, major serà la presència de pics i valls.

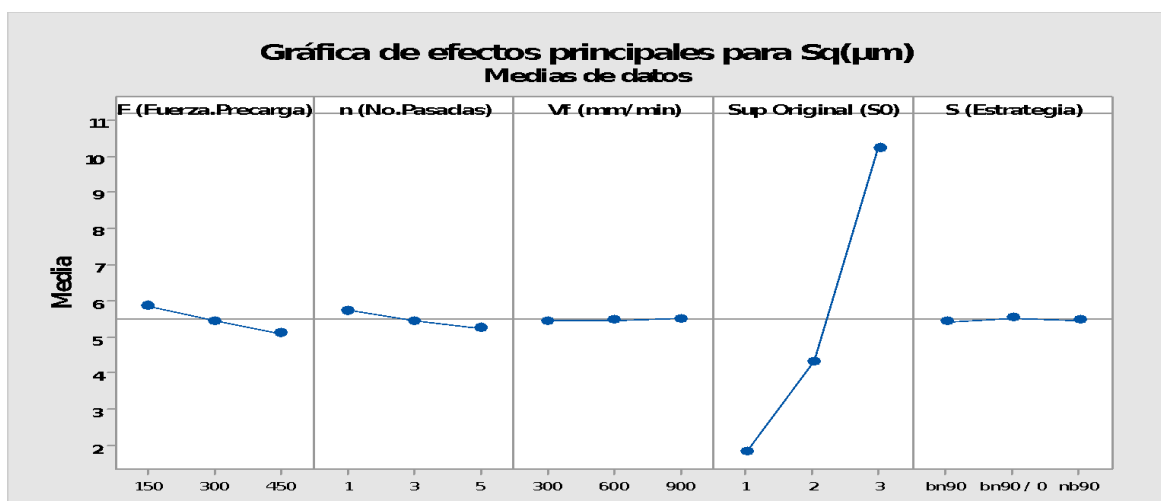


Figura 4.17. - Gràfica d'efectes principals per Sq.

Les gràfiques dels efectes principals no mostren les interaccions entre els factors pel que es procedeix a realitzar una gràfica d'interacció mostrada a la figura 4.18 de les que es poden concloure les conclusions següents:

- En l'última columna de la figura es pot apreciar que la topologia de la superfície original S0 té gran influència sobre la variable Sq, augmentant amb el nivell de rugositat, la presència d'aquesta variable és la causant de pics i valls sobre la superfície. En presència de S0, la resta de les variables no influeix sobre Sq.
- Al final de la tercera columna es pot observar a més que, en eliminar la influència de S0 sobre Sq, que els factors com l'estratègia traçada S i la velocitat de pas Vf presenten línies no paral·leles, el que significa que aquest efecte d'interacció és que Vf = 600mm/min i l'estratègia S = nb0 són els que més afavoreixen l'augment de Sq, és a dir, provoquen que la superfície sigui més rugosa i per tant amb més presència de pics i valls.
- La combinació de Vf = 300 mm/min i S = bn90/0 també obtenen alts valors de Sq, de manera que també afavoreixen la rugositat de la superfície i per tant la presència de pics i valls.

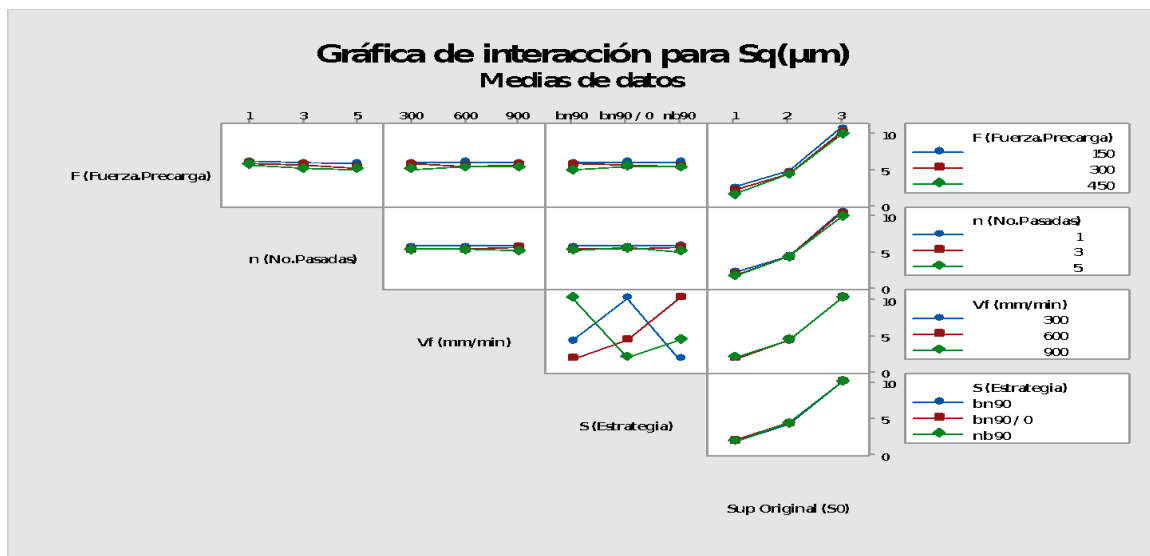


Figura 4.18. - Gràfica de les interaccions per a la variable Sq.

En analitzar la gràfica de la figura 4.19, relacionada amb els efectes principals per a la variable Sq i tenint en compte la tecnologia amb vibració assistida per a les variables n, S0, Vf i S, la línia és gairebé horitzontal pel que es considera que no hi ha efecte principal. En canvi, la variable F mostra que hi ha un efecte principal ja que la línia presenta una

pendent pronunciada. Aquí s'evidencia clarament que en augmentar la força de precàrrega sobre la superfície, major serà la presència de pics i valls en la superfície.

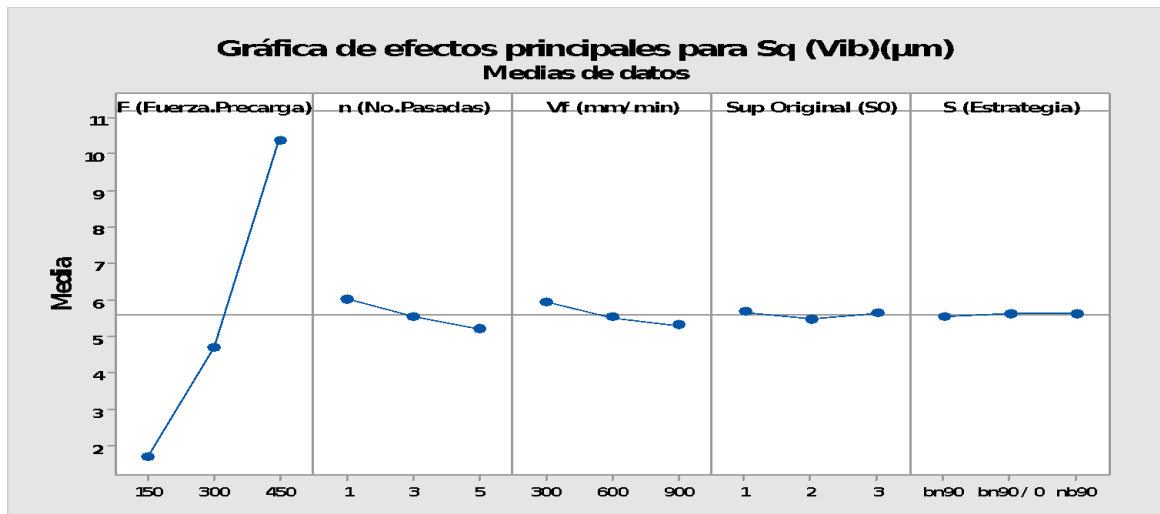


Figura 4.19. - Gràfica d'efectes principals per Sq amb vibració.

A continuació, a la figura 4.20, s'analitzarà la interacció entre els factors i la variable resposta Sq amb vibració. D'aquí es pot concloure que:

- A la primera fila es pot observar que el factor F o força de precàrrega és l'únic que influeix significativament en el valor de Sq amb vibració, determinant-se que a mesura que augmenta la força de precàrrega, la superfície augmenta la seva rugositat i per tant la presència de pics i valls en la mateixa.
- Per a la resta dels factors el comportament de les línies és normal, és a dir, les línies són paral·leles així és que no influeixen sobre el paràmetre Sq amb vibració.

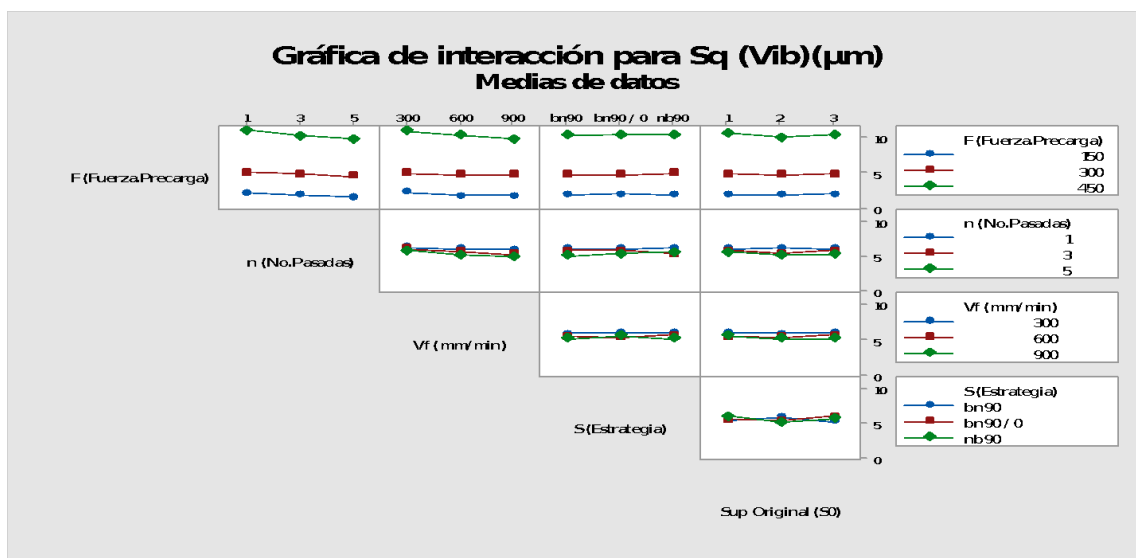
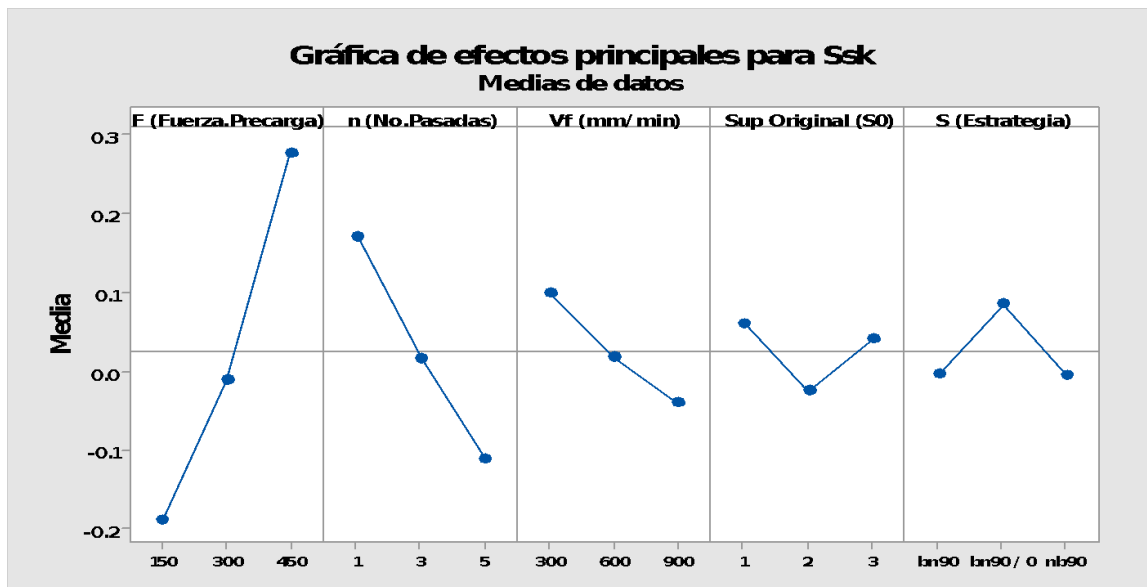


Figura 4.20. - Gràfica de les interaccions per a la variable Sq amb vibració.



**B) Anàlisi de la variable resposta Ssk**

En analitzar la gràfica de la figura 4.21 relacionada amb els efectes principals per a la variable Ssk sense vibració per a les variables: F, n, Vf i S, no s'observen línies horitzontals sinó amb pendents positives (F) i negatives (n) i a més amb monotònies diferents (S0 i S), el que es pot dir que hi ha efectes principals sobre la variable Ssk, per la qual cosa es procedirà a realitzar l'anàlisi de les interaccions dels factors per analitzar com és afectada la variable resposta.



**Figura 4.21. - Gràfica d'efectes principals per SSK sense vibració.**

En realitzar l'anàlisi de interaccions dels factors en estudi amb la variable Ssk, mostrat a la figura 422, es pot concloure el següent:

- La variable Ssk és sensible als tots factors estudiats.
- A la primera fila es pot observar que a mesura que augmenta la força de precàrrega (F) augmenta el valor de Ssk, és a dir, s'afavoreix la presència de pics i valls. A més, es pot observar que per a F = 300N s'aconsegueix la major estabilitat en la variable Ssk, és a dir, la superfície és més llisa.
- A la primera columna es pot analitzar a més que el nombre de passades provoca la disminució de pics i valls.
- A la segona fila es pot veure que el nombre de passades (n) influeix també sobre la variable resposta, és a dir, en augmentar n s'obtenen valors més baixos de Ssk, de manera que afavoreix la presència de valls sobre la superfície.

- En la darrera columna es pot veure que pel que fa al factor que correspon a la topologia de la superfície original (S0), la força de precàrrega és qui provoca major variació del paràmetre Ssk, detectant que per a  $F = 450\text{N}$  i  $S0 = 1$ , és a dir quan la superfície és més llisa, s'observen majors valors de Ssk.

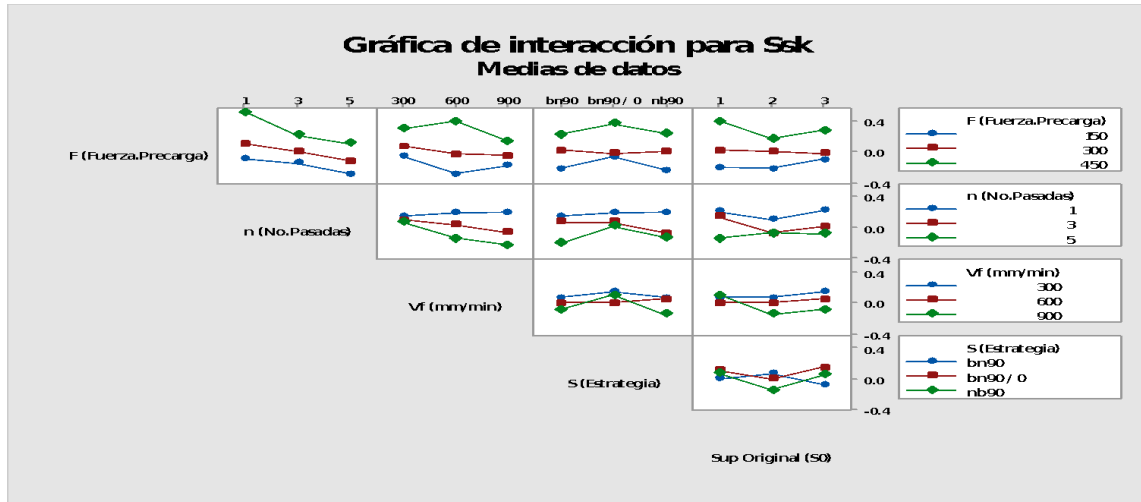


Figura 4.22. - Gràfica de les interaccions per a la variable Ssk sense vibració.

En analitzar el paràmetre Ssk amb vibració es pot observar a la figura 4.23 la presència d'efectes principals en tots els factors estudiats, de manera que es procedirà a realitzar l'anàlisi de les interaccions per veure amb més detalls la relació entre els factors i la variable resposta.

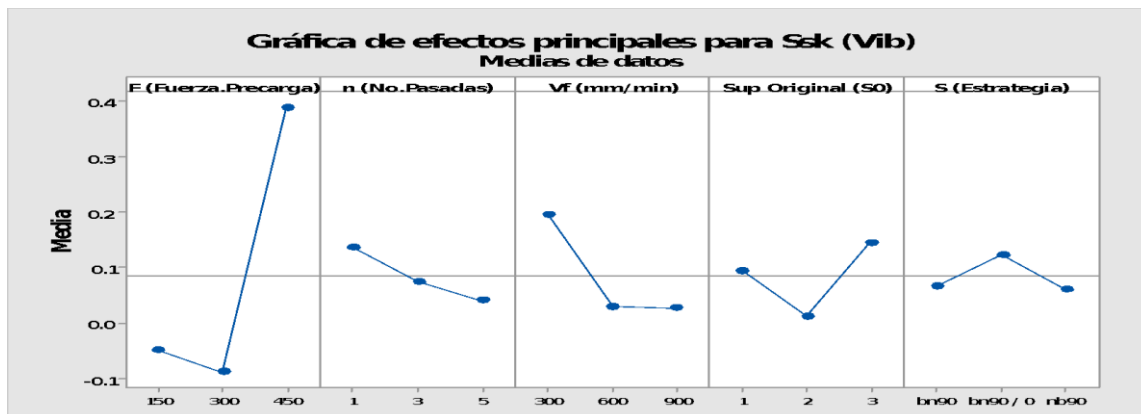


Figura 4.23. - Gràfica d'efectes principals per SSK amb vibració.

En realitzar el gràfic de les interaccions mostrat a la figura 4.24 per a la variable Ssk amb vibració assistida es pot concloure el següent:

- A la primera fila es pot observar que la força de precàrrega interacciona amb la variable resposta Ssk amb tecnologia de vibració assistida. Per a les forces de 150N

i 300N, les línies si bé no són paral·leles es mantenen el més estable possible, però en augmentar la força a 450N aquesta provoca variació de Ssk (Vib).

- Per  $F = 450\text{N}$ , en augmentar el nombre de passades la superfície es va disminuint el valor de Ssk (Vib), el que significa que disminueix la presència de pics i valls.
- La velocitat de passada també interacciona amb la variable Ssk, al final de la tercera columna es pot observar que per a la velocitat més baixa (300 mm/min) i amb l'estratègia  $S = \text{bn}90/0$  s'assoleixen alts valors de Ssk.

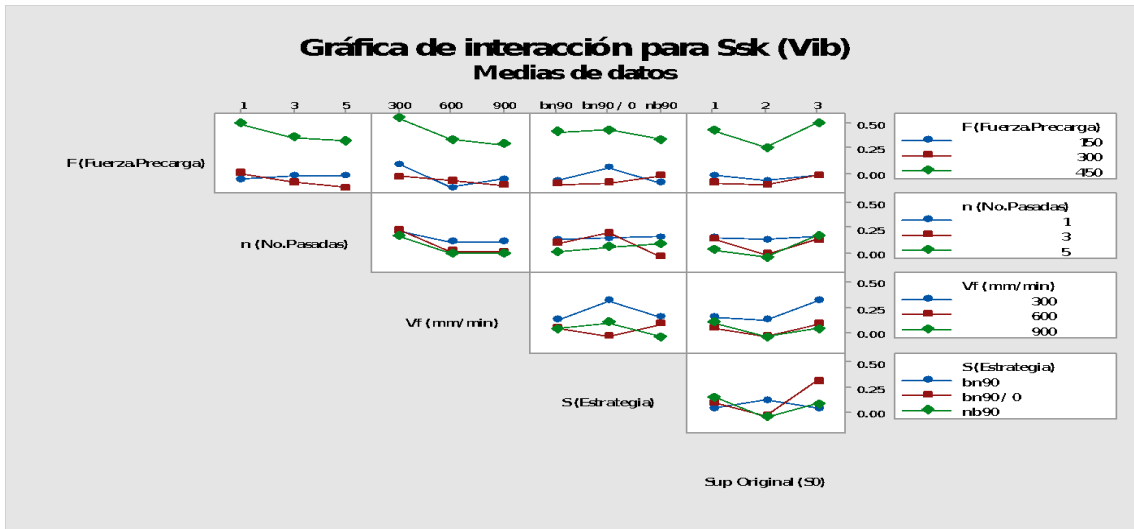


Figura 4.24. - Gràfica de les interaccions per a la variable Ssk amb vibració.

### C) Anàlisi de la variable resposta Sku

En analitzar la gràfica d'efectes principals per a la variable Sku, mostrada a la figura 4.25, es pot observar la presència d'efectes principals per a tots els factors estudiats, veient major variació en les variables: força de precàrrega i nombre de passades, de manera que es fa necessari analitzar les interaccions entre els factors.

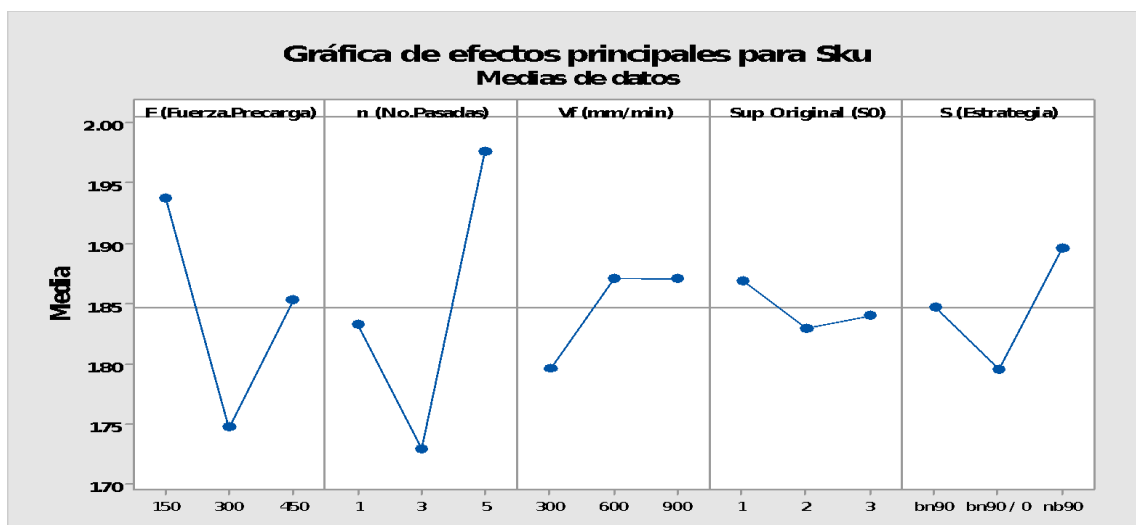


Figura 4.25. - Gràfica d'efectes principals per Sku sense vibració.

Pel que fa a les interaccions entre els factors, es pot observar a la figura 4.26 el següent:

- A la primera columna es pot veure que quan s'aplica la menor força de precàrrega (N) i per n = 5, o sigui, el major nombre de passades de l'eina de brunyit, s'obtenen els valors més grans de la variable Sku, o sigui, s'afavoreix la presència de pics desmesuradament alts i valls molt profundes.
- En l'última columna es pot veure com la topologia de la superfície original (S0) també interacciona amb la resta dels factors, no seguint cap patró específic. On major variabilitat s'observa és per S0 = 2, que correspon a la superfície mitjana (entre llisa i rugosa).

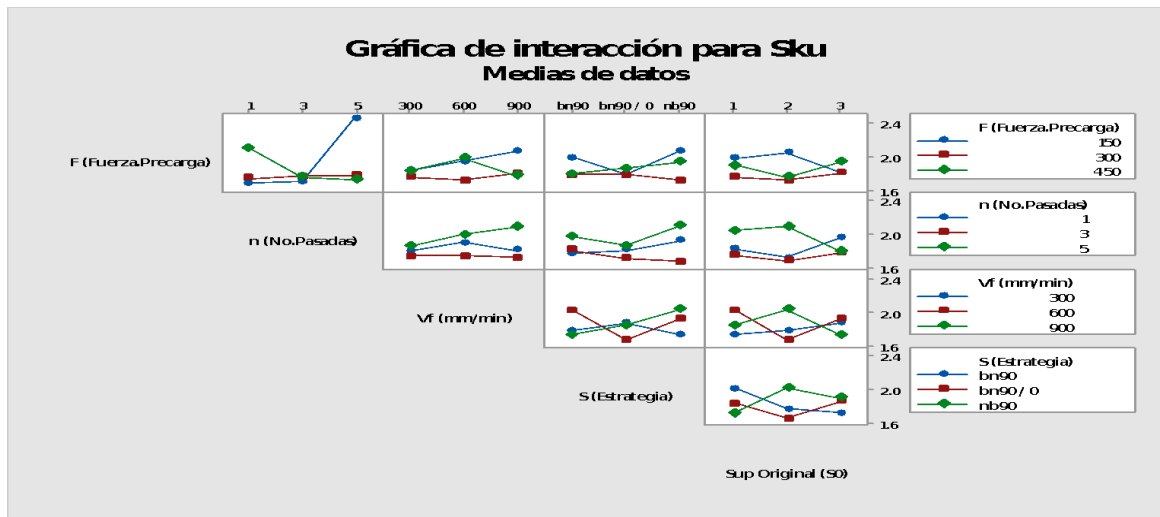
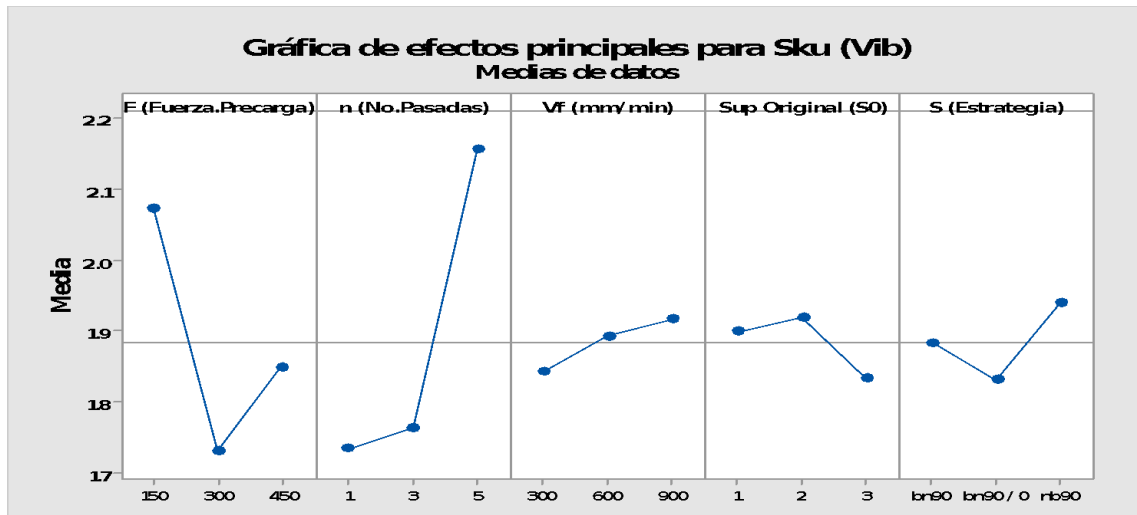


Figura 4.26. - Gràfica de les interaccions per a la variable Sku sense vibració.

En analitzar la gràfica dels efectes principals de la figura 4.27 per a la variable Sku amb la tècnica de vibració es pot observar que el comportament és similar a la mateixa variable Sku però sense vibració assistida. A causa de la presència d'efectes principals es procedirà a analitzar la gràfica de les interaccions.



**Figura 4.27. - Gràfica d'efectes principals per Sku amb vibració.**

La figura 4.28 mostra les interaccions entre els diferents factors i la variable resposta conclouent el següent:

- El factor Força de precàrrega interacciona amb la resta dels factors ja es pot veure que les línies no són totes paral·leles. A la primera columna es pot veure que en combinar el nombre passades major ( $n = 5$ ) i la menor força ( $F = 150N$ ) s'obtenen valors elevats de la variable resposta, és a dir, s'afavoreix la presència de pics desmesuradament grans i valls profunds.
- L'aplicació de la menor força i amb l'augment de la velocitat de pas la variable Sku (Vib) augmenta de manera que afavoreix la rugositat de la superfície i per tant la presència de valls i pics extrems.
- La topologia de la superfície original també interactua amb els altres factors sense formar un patró específic. Particularment en augmentar la velocitat de passada i per l'estratègia seguida pel brunyit nb0 s'obtenen pics de valors més alts per Sku (Vib) que amb altres combinacions d'aquests mateixos factors.

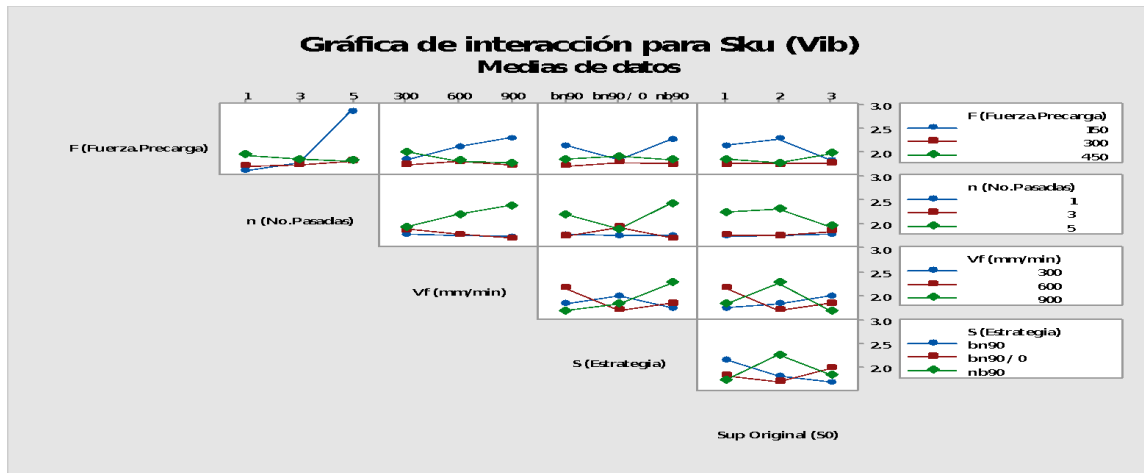


Figura 4.28. - Gràfica de les interaccions per a la variable Sku amb vibració.

**D) Anàlisi de la variable resposta S10z**

A la figura 4.29 es pot evidenciar l'existència d'efecte principal en el factor Força de precàrrega per a la variable S10z sense vibració assistida, ja que aquesta presenta un pendent inclinat, el que comporta a analitzar la presència d'interaccions amb la resta dels factors. La resta dels factors té un comportament normal ja que les línies són pràcticament horitzontals.

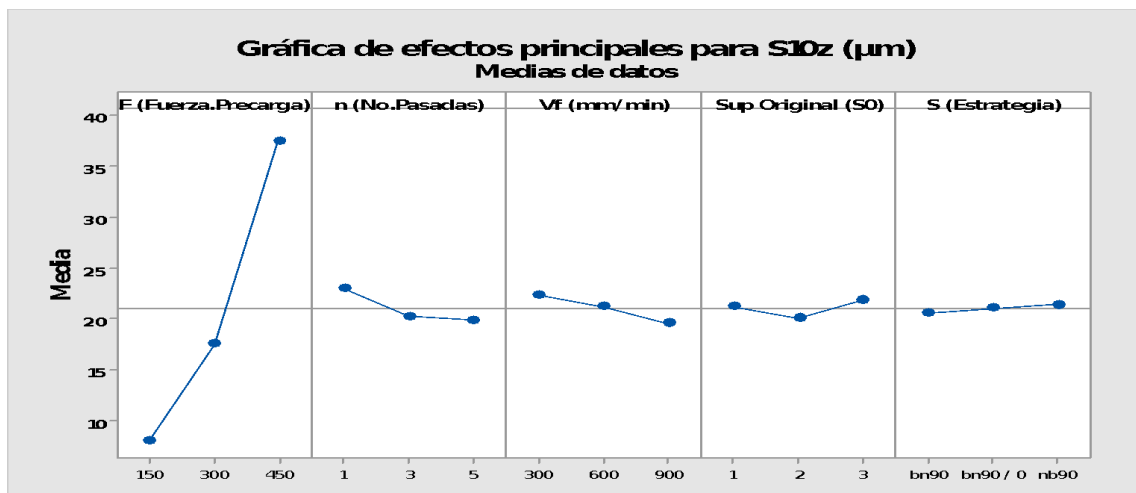


Figura 4.29. - Gràfica d'efectes principals per S10z sense vibració.

En la gràfica de la figura 4.30 es pot observar que l'únic factor que interacciona amb la resta és la força de precàrrega doncs a mesura que augmenta el valor d'aquesta variable s'obté valors més elevats de la variable S10z, de manera que això implica un augment en la variació entre els punts més alts i més baixos de la superfície.

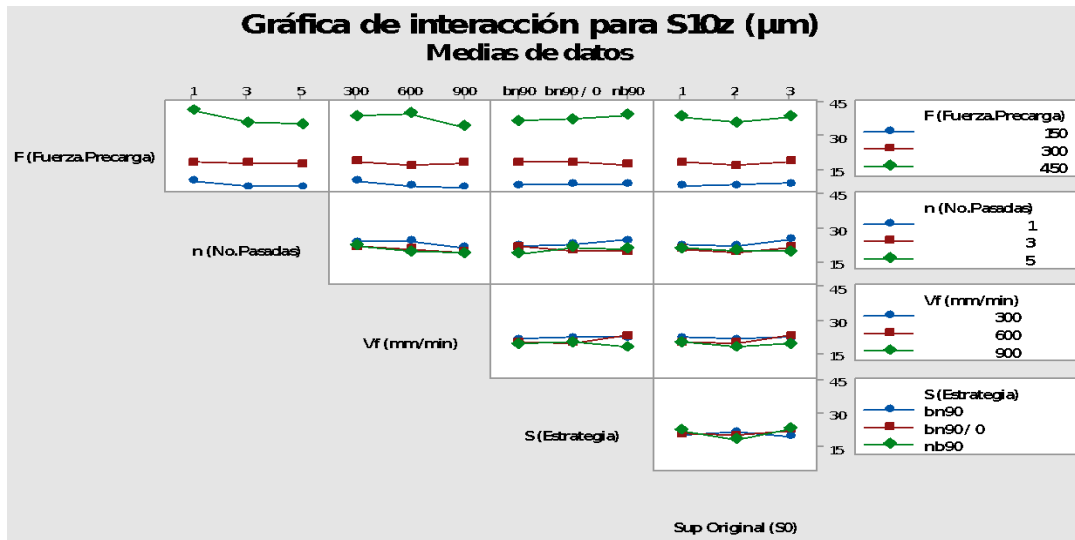


Figura 4.30. - Gràfica de les interaccions per a la variable S10z sense vibració.

A la figura 4.31 es pot evidenciar l'existència d'efecte principal en el factor de força de precàrrega per a la variable S10z amb vibració assistida, ja que aquesta presenta una pendent inclinada, el que comporta a analitzar la presència d'interaccions amb la resta dels factors. El comportament d'aquesta variable és molt similar a ella mateixa, però sense aplicar vibració assistida.

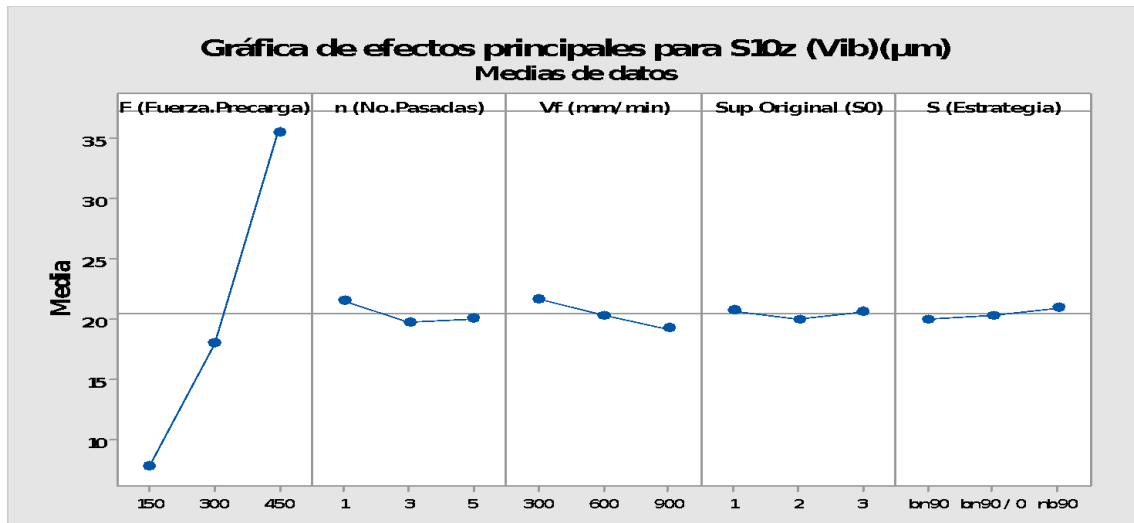


Figura 4.31. - Gràfica d'efectes principals per S10z amb vibració.

En la gràfica de la figura 4.32 es pot observar que l'únic factor que interacciona amb la resta és la força de precàrrega doncs a mesura que augmenta el valor d'aquesta variable s'obtenen valors més elevats de la variable S10z amb vibració assistida, de manera que això implica un augment en la variació entre els punts més alts i més baixos de la

superfície. La diferència entre les variables S10z amb i sense vibració és que amb vibració assistida el rang de variació entre els punts més alts i més baixos és molt més gran.

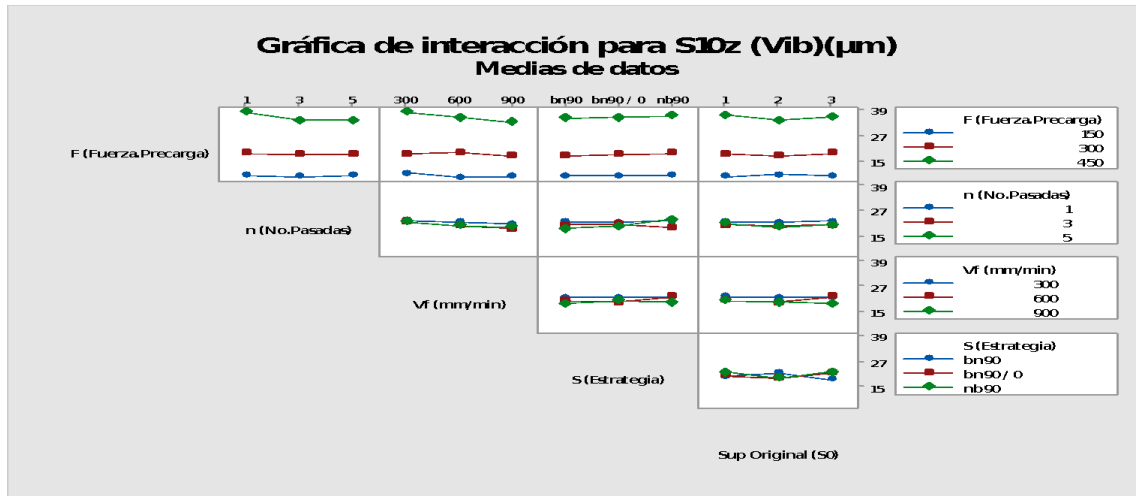


Figura 4.32. - Gràfica de les interaccions per a la variable S10z amb vibració.



## 5. Pressupost i / o Anàlisi Econòmica

Atès que es tracta d'un projecte d'investigació en laboratori, no es consideraran impactes mediambientals més enllà del consum elèctric causat per l'ús de maquinària. Es plantejarà un escenari en el qual una empresa de disseny, que compta amb laboratori d'assajos, vol realitzar l'estudi, però no vol invertir en una màquina fresadora de control numèric ja que no es dedica a la mecanització i externalitza el procés de mecanitzat i brunyit. L'únic material que adquireix és el necessari per realitzar els estudis de rugositat i resistència, és a dir, el perfilòmetre i el duròmetre.

A continuació, es pot veure el desglossament de tots els costos, amb uns preus hora estimats de mà d'obra, preus de mercat de material i estimació de costos de mecanitzat i brunyit en una empresa especialitzada.

A les següents taules es poden apreciar els desglossaments dels costos dels materials abordats en el capítol 1, així com el cost total, ascendint a 7.253,78 euros.

COMPRA DE MATERIAL I EQUIPS	QUANTITAT	PREU (€ / h)	TOTAL (€)
Peça objectiu UDIMET 720	1	-	100,00
Perfilòmetre òptic MICROMESURE 2	1	2.360,00	2.360,00
Duròmetre PCE-3000UL [10]	1	2.396,89	2.396,89
Ordinador ASUS Zenbook 3 [11]	1	1.149,00	2.396,89
<i>total</i>			<b>7.253,78</b>

**Taula 5.1: Capítol 1. Compra de material i equips.**

A la taula 5.2 es pot veure que el valor total del lloguer de màquines abordat en el capítol 2 ascendeix a un valor de 610,00 euros en funció de la quantitat d'hores usades.

Amortització DE LES MÀQUINES	QUANTITAT	TEMPS (h)	PREU (€ / h)	TOTAL (€)
Fresadora Lagun MC 600 CNC	1	3	150	450,00
Fresa hemisfèrica Sandvik d = 100 mm, 4 grans	1	1	60	60,00
Eina de brunyit amb bola	1	0,5	100	500,00
<i>total</i>				<b>610,00</b>

**Taula 5.2: Capítol 2. Lloguer de les màquines.**

En valorar la mà d'obra es va tenir en compte la quantitat d'obriers contractats, la quantitat d'hora i el cost de mà d'obra per hores. A la taula 5.3 es reflecteixen els obrers contractats i el cost total en euros, el qual ascendeix a un total de € 2.474,50.

MÀ D'OBRA	QUANTITAT	TEMPS (h)	PREU (€ / h)	TOTAL (€)
Mecanitzat superfície	3	0.5	50	75,00
Brunyit per empremta	54	0.25	50	675,00
Estudi de rugositat per empremta	21	0.5	75	787,50
Calibratge assaig de duresa	1	2.0	75	150,00
Estudi de duresa per empremta	21	0.5	75	787,00
<i>total</i>				<b>2.474,50</b>

**Taula 5.3: Capítol 3. Mà d'obra.**

A la taula 5.4, mostrada a continuació es pot apreciar que el cost total de les despeses d'enginyeria abordats en el capítol 4 és de €2.385,00.

DESPESES D'ENGINYERIA	QUANTITAT	TEMPS (h)	PREU (€ / h)	TOTAL (€)
Recerca i anàlisi d'informació	1	60	15	900,00
Disseny de l'experiment	1	3	15	45,00
Creació del codi CNC	1	6	15	90,00
Anàlisi de la informació	1	100	15	150,00
Elaboració de la memòria	1	60	15	900,00
Revisió del document	1	12	25	300,00
<i>total</i>				<b>2.385,00</b>

**Taula 5.4: Capítol 4. Despeses d'enginyeria.**

Finalment s'analitza en la taula 5.5 el total gastat tenint en compte l'energia utilitzada, es pot apreciar que el valor total no és tan alt, aquest ascendeix a €10,43.

DESPESES ENERGÈTICS	QUANTITAT AT (W)	TEMPS (h)	PREU (€ / kWh)	TOTAL (€)
Perfilòmetre òptic MICROMESURE 2	25	25	0,175	0,109375
Perfilòmetre òptic MICROMESURE 2 [9]	45	30	0,175	0,23625
Duròmetre PCE-3000UL [10]	180	320	0,175	10,08
<i>total</i>				<b>10,43</b>

**Taula 5.5: Capítol 5. Despeses energètiques.**

En calcular el cost total tenint en compte els diferents conceptes esmentats anteriorment, aquest ascendeix a un total de **€ 12.733,71**.

## Conclusions

1. S'ha pogut determinar que de les 54 empremtes que hi ha a la peça objectiu, la número 23 i 25 són les que tenen les condicions més òptimes ja que tenen la  $Sq$  i la  $S10z$  més baixa de totes, i és el que estàvem buscant ja que a més escala tingui la textura, més mecanitzada quedarà la superfície i menys probabilitat hi haurà de generar esquerdes o fissures.
2. Respecte a la *skewness* o  $Ssk$ , hem pogut observar que aquestes dues empremtes són les que tenen la magnitud amb més valls, encara que totes les mostres obtingudes sobre aquest resultat tenen una escala significativament petita i no resulta tan rellevant com la curtosis, per exemple, on tenen la mesura més pròxima a 3, indicador de distribució gaussiana ideal, sense pics o valls pronunciades. Per aquests motius podem confirmar aquestes dues empremtes com les òptimes.
3.  $Sq$ : Aquest resultat quantitatiu mostra que, clarament, el factor predominant que determina el seu comportament és la superfície inicial ( $S0$ ). Els altres factors tenen uns resultats exògens al problema en si.
4.  $Ssk$ : Quant al *skewness*, d'origen qualitatiu, la superfície inicial segueix tenen una clara influència sobre el comportament, encara que la força ( $F$ ) té un p-valor proper al límit de 0.05 que, encara que es passi per sobre de l'establert, té probabilitats de ser igualment influent. Respecte els altres paràmetres segueixen sent exògens però amb una magnitud lleugerament menor que respecte  $Sq$ .
5.  $Sku$ : Respecte el valor de curtosis, no podem trobar cap paràmetre clarament influent. El que més s'acosta és la força amb un p-valor de 0,193, encara que no determina cap tipus d'influència directament.
6.  $S10z$ : Finalment tenim el valor quantitatiu dels 10 pics més pronunciats de la superfície. En aquest paràmetre trobem que la superfície inicial segueix dominant el comportament, amb uns resultats molt similars als de  $Sq$ , com ja s'esperava.

## Bibliografia

1. Travieso-Rodríguez, JA et al. *Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel Specimens. A: International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, Vol. 81, núm. 9-12, pàg. Des de 1757 fins 1765. ISSN 14333015. DOI 10.1007 / s00170-015-7255-3.
2. Travieso-Rodríguez, J. a. et al. *Experimental Study on the Mechanical Effects of the Vibration-Assisted Ball-Burnishing Process. A: Materials and Manufacturing Processes [en línia]*. 2015, Vol. 30, núm. 12, pàg. 1490-1497. ISSN 1042-6914. DOI 10.1080 / 10426914.2015.1019114. Disponible a:<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2015.1019114>.
3. Travieso-Rodríguez, JA; Gómez, G.; Jorba Peiró, J.; Carrillo, F.; Desse, G.; Alexis, J.; Gonzalez, H. Experimental study on the mechanical effects of ball burnishing vibration-assisted process. *International Journal of Material and manufacturing processes*.
4. Gómez, G .; Travieso-Rodríguez, JA; Gonzalez, H.; Nàpols, A.; Carrillo, F.; Desse, G. (2014). *Ball-burnishing vibration-assisted process*. TMT 2014 Proceedings, pàgs: 25-28. ISBN: 1840-4944.
5. *Properties of AISI 1.038 Steel*. A: [en línia]. Disponible a:<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7741>
6. Gomez-Gras, G. et al. *Experimental study of lateral pass width in conventional and vibrations-assisted ball burnishing. A: International Journal of Advanced Manufacturing Technology [en línia]*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, pàg. 1-9. ISSN 14333015. DOI 10.1007 / s00170-016-8490-i. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8490-y>.
7. Jerez Mesa, R. *Study and characterization of surface Integrity modification a.er ultrasonic vibration-assisted ball burnishing*. Pag 77
8. Marco Villanueva, A San-juán-Fernández,C. <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/01/colapsos-estructurales-historicos-parte-4-ano-1847/>
9. Interempresas, <http://www.interempresas.net/Medicion/FeriaVirtual/Producto-Sistema-de-microtopografia-y-perfilometria-12422.html>
10. PCE-Instruments, [https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/durometro-novotest-ltd.-dur\\_metro-pce-3000ul-det\\_5839016.htm?list=kat&listpos=24](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/durometro-novotest-ltd.-dur_metro-pce-3000ul-det_5839016.htm?list=kat&listpos=24)
11. Eltallanglès.S.A., <https://www.elcorteingles.es/electronica/A23192667-portatil-asus-zenbook-3-deluxe-ux490ua-be032t-i7-8-gb-256-gb-ssd/>

## Annex A1. Resultats de les empremtes

A continuació es mostrarà el resultat d'analitzar cada empremta de la mostra classificant-les per àrees, de més fina (esquerra), passant per una rugositat intermèdia (dreta), i acabant per la més abrupta (mitjà). Dins de la taula es podrà veure la comparació entre vibració (VABB) i no vibració (NVABB).

		0	1	6	8	11	13	18	21	23	25
NVABB	Sa (µm)	2.7038	2.1985	2.0181	1.8315	1.8839	1.7151	1.4704	1.7178	0,8824	0,8251
	Sq (µm)	3.232	2.4512	2.2419	2.1905	2.1189	1.9128	1,623	1,99	1.0551	1.0012
	Ssk	-0,0080	-0,0749	-0,1627	-0,0762	-0,1312	-0,2567	-0,0785	0,0031	-0,5009	-0,4265
	Sku	2.2836	1.7087	1.5924	1.6992	1.7187	1.6719	1.6753	2.0428	2.5301	2.8021
	S10z (µm)	15.662	11.085	9.0435	8.7655	8.6851	7.5698	5.866	9.8664	5.8281	6.1801
VABB	Sa (µm)	0	2.0201	1,768	1,701	1.7733	1.4283	1.3157	1.6061	0,96486	0,92456
	Sq (µm)	0	2.2353	1.9549	1.8854	1.9914	1.6008	1.4886	1.8706	1.1541	1.1576
	Ssk	0	0,01850	-,1209	-,1152	0,01913	-0,18	0,05669	0,2046	-,1689	-,1504
	Sku	0	1.5834	1.5853	1.5955	1.7627	1.7105	1.7795	2.1233	3.0159	3,496
	S10z (µm)	0	8.8864	7.4896	7.2298	8971	6.6612	6.3932	8.9674	6.6545	8.6926

Taula A1. Resultats de la part de l'esquerra

		0	2	4	9	12	14	16	19	24	26
NVABB	Sa (µm)	4.8265	4.1473	3.9074	3.9007	3.8958	3.6497	3.6645	3.5909	3.7547	3.6965
	Sq (µm)	5.6005	4.7618	4.4553	4.4421	4.4555	4.1562	4.2587	4.0989	4.2419	4.228
	Ssk	0,25408	0,1213	0,1098	0,06377	0,0908	-0,0499	-0,0607	-0,0291	-0,1785	-0,1782
	Sku	1.9074	1.7906	1.7109	1.6803	1.7108	1.6897	1.8674	1.7414	1.7136	1.8197
	S10z (µm)	21.507	20.079	17.5590	16.572	18,07	15.772	18.659	17.177	16.438	17.955
VABB	Sa (µm)	0	4.4398	4.2893	4.3546	4.3225	3.9136	4.087	3.9501	3.8971	3.8352
	Sq (µm)	0	5.0778	4.8817	4.9417	4.9273	4.4991	4.6188	4.4903	4.4942	4.3964
	Ssk	0	0,07457	-0,0589	-0,0474	-0,0231	-0,1496	-0,1154	-0,1874	-0,0499	-0,2363
	Sku	0	1.7171	1.6962	1.6553	1.6954	1.8022	1.6361	1.7184	1.8589	1.8044
	S10z (µm)	0	18.987	18.6360	17.482	18.583	17.914	16.788	16.707	19,9	17.174

Taula A2. Resultats de la part de la dreta

		0	2	4	9	12	14	16	19	24	26
NVABB	Sa (µm)	9.769	9.2588	9.0161	9.0521	9.2309	9.1424	8.4482	9.0815	8.5448	8.2867
	Sq (µm)	11.437	10,84	10.7880	10.643	10.529	10,51	9.5286	10.408	9.7024	9.3415
	Ssk	0,50388	0,37786	0,5942	0,57607	0,31527	0,38905	-,0786	0,2068	0,20934	-,1053
	Sku	2.0435	1.8907	2.3727	2.0442	1.7744	1.8338	1,62	1.7831	1.7245	1.6285
	S10z (µm)	45.482	39.778	45.9240	38.257	37.786	37.684	32.451	38.806	35.402	31.679
VABB	Sa (µm)	0	9.6962	9.5367	9.3414	9.2708	9.1531	8.2899	9.3407	8.4222	7.9494
	Sq (µm)	0	11,31	11.0890	10.851	10.976	10.486	9.3549	10.748	9.5556	9.1322
	Ssk	0	0,53456	0,4836	0,46313	0,66334	0,35147	0,05121	0,45092	0,16088	0,3425
	Sku	0	1.9672	1.9405	1.8686	2.1218	1.7533	1.6151	1.8995	1.6763	1.8023
	S10z (µm)	0	39.172	39.0830	37.073	36.818	34.789	31.206	38.681	32.396	31.383

Taula A3. Resultats de la part del mig

## Annex A2. superfícies 3D

Aquest annex conté les superfícies en tres dimensions de totes les empremtes, amb una distribució igual a la de l'annex anterior, és a dir, esquerra, dreta i mig, que és de més fi a més rugós. També es mostrarà la comparativa entre VABB i NVABB de cada petjada.

### Superfície 1 - Esquerra

#### EMPREMTA 1

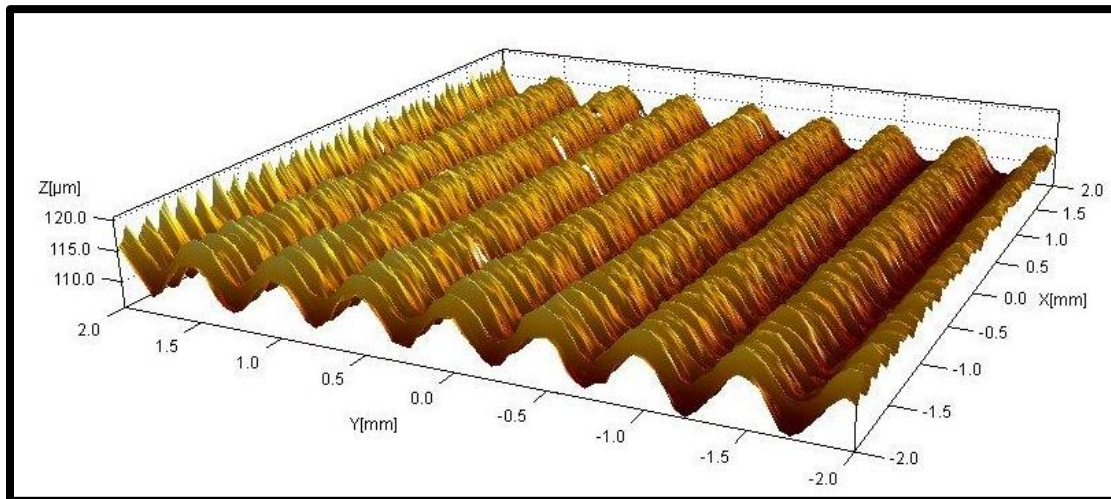


Figura A2.1. NVABB

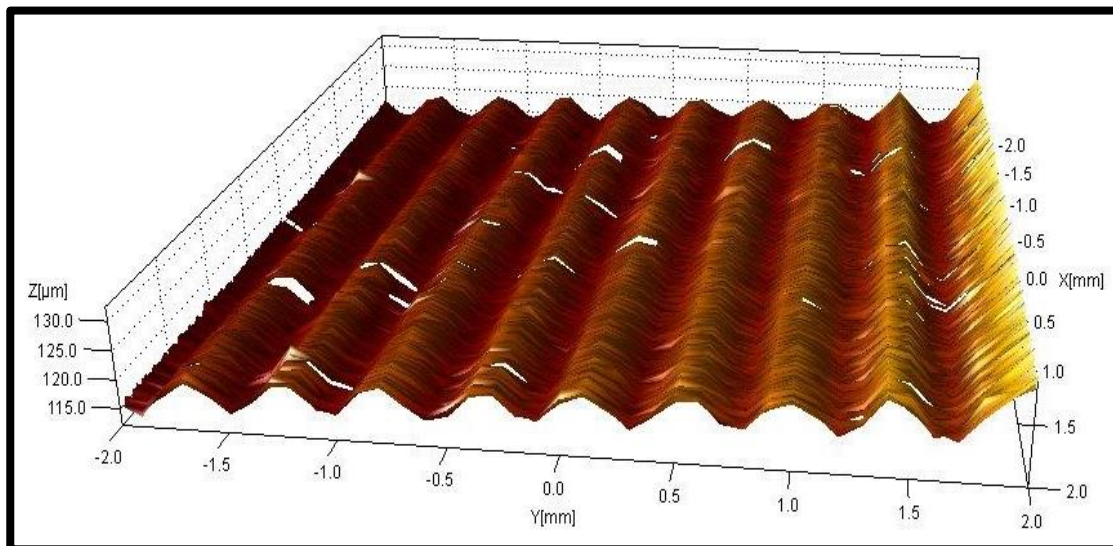
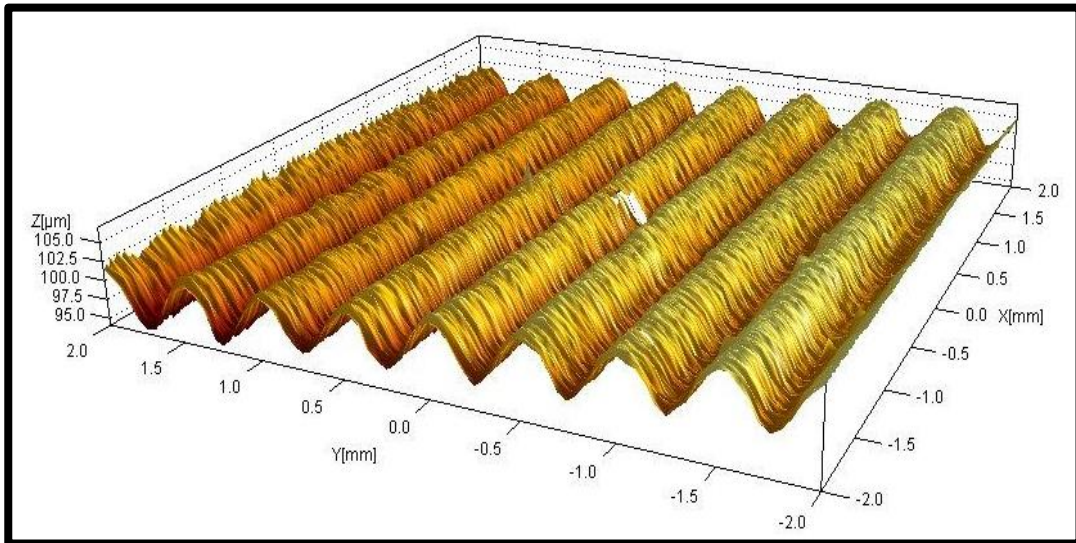
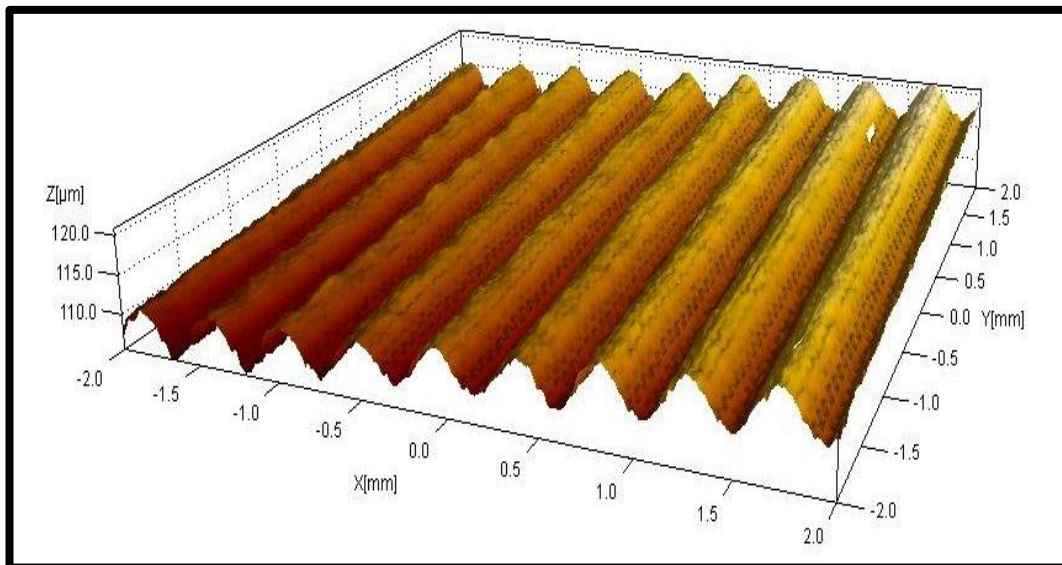


Figura A2.2. VABB

**EMPREMTA 6**

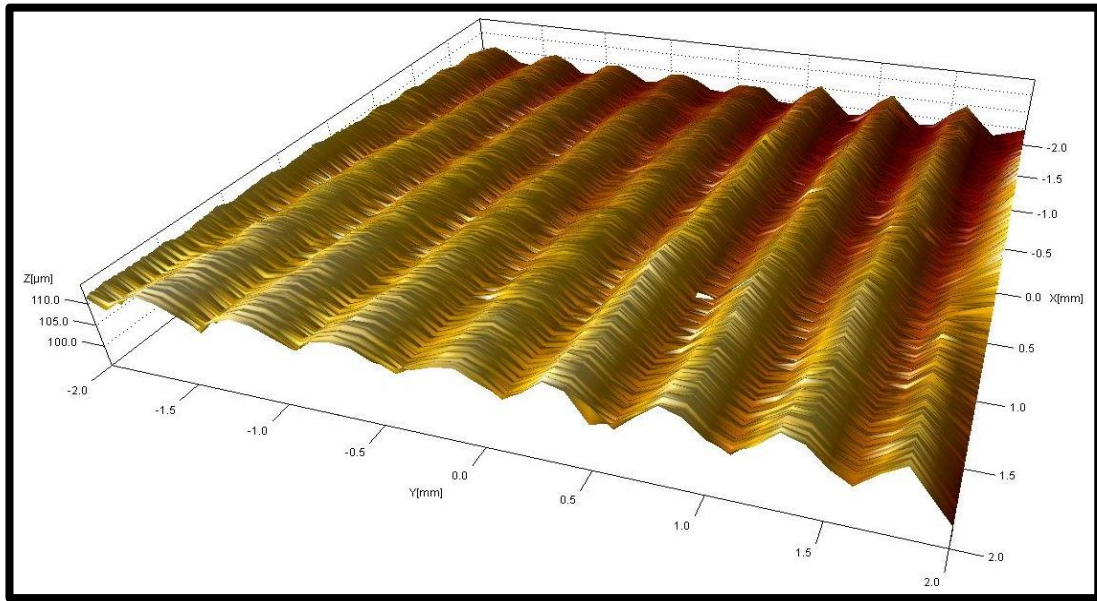


*Figura A2.3. NVABB*

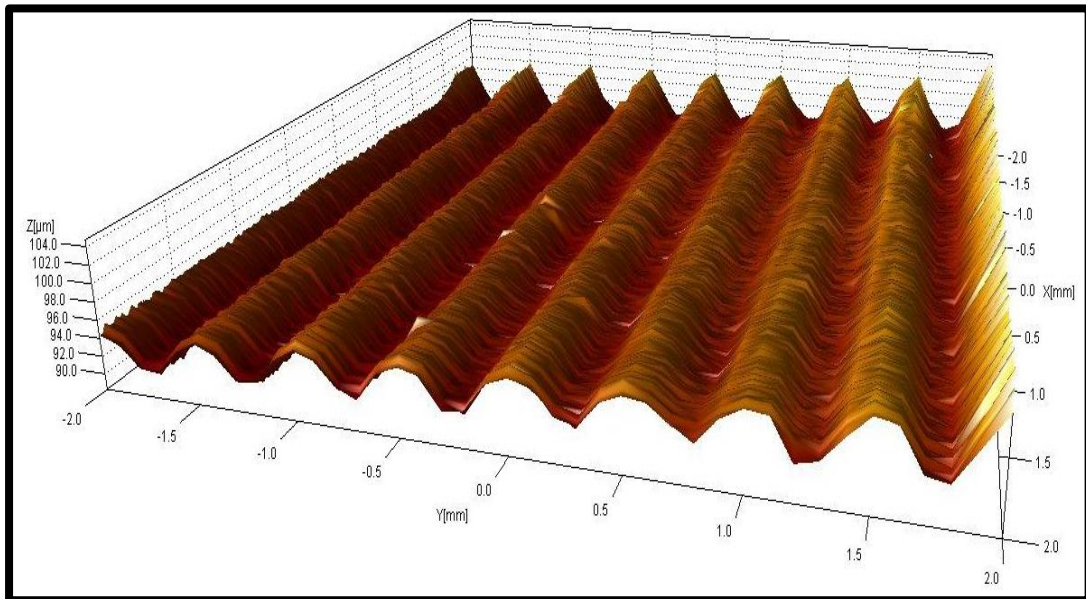


*Figura A2.4. VABB*

**EMPREMTA 8**



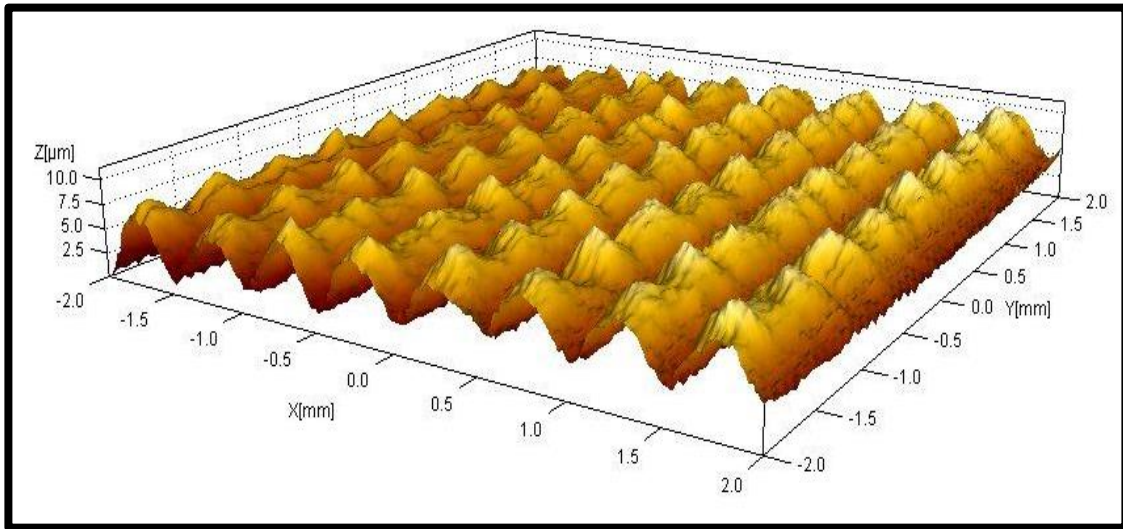
*figura A2.5.NVABB*



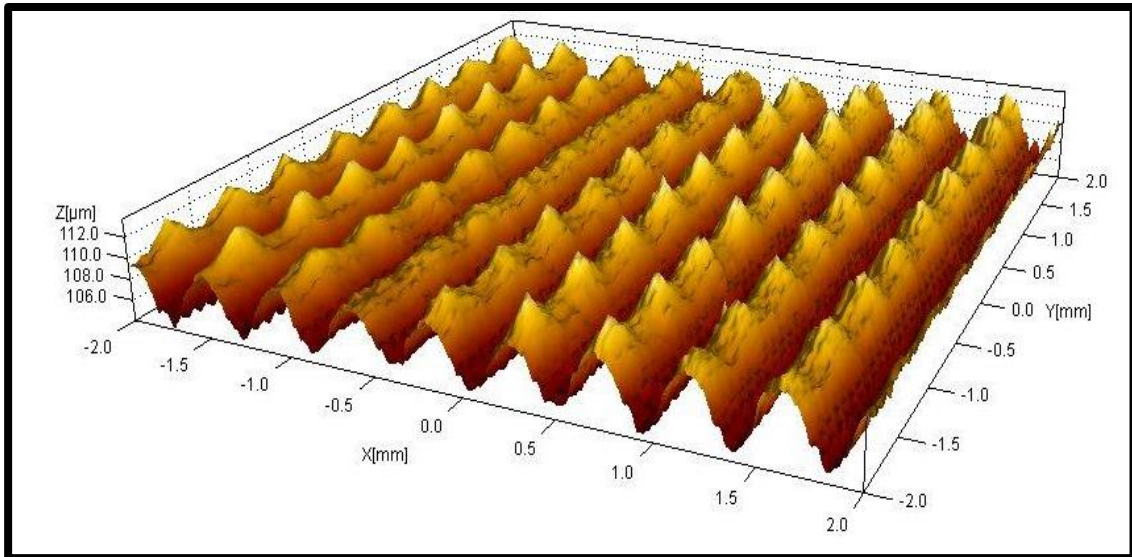
*Figura A2.6. VABB*



**EMPREMTA 11**

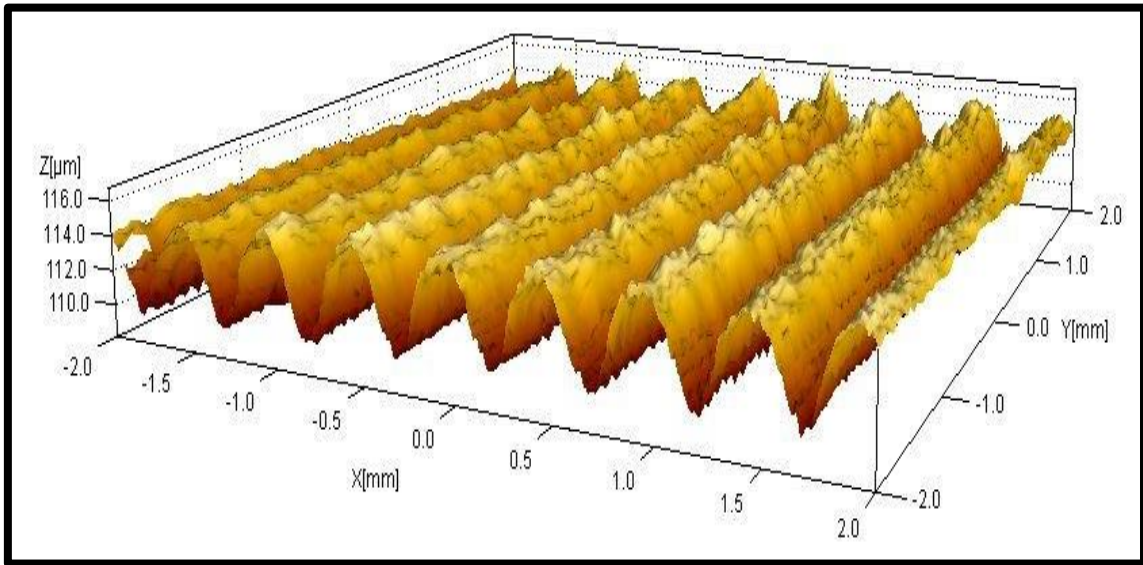


*figura A2.7.NVABB*

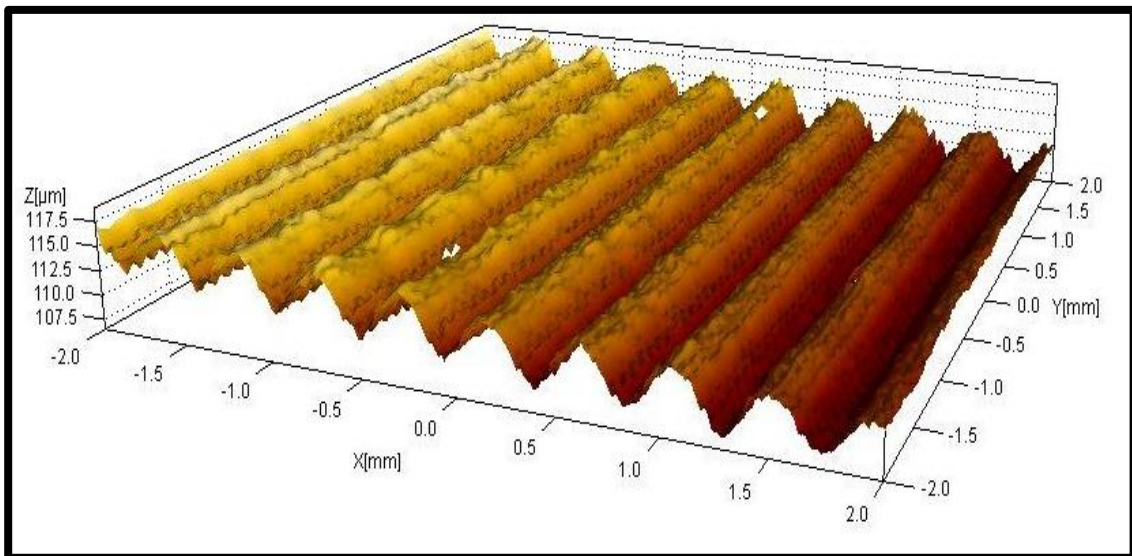


*Figura A2.8. VABB*

**EMPREMTA 13**

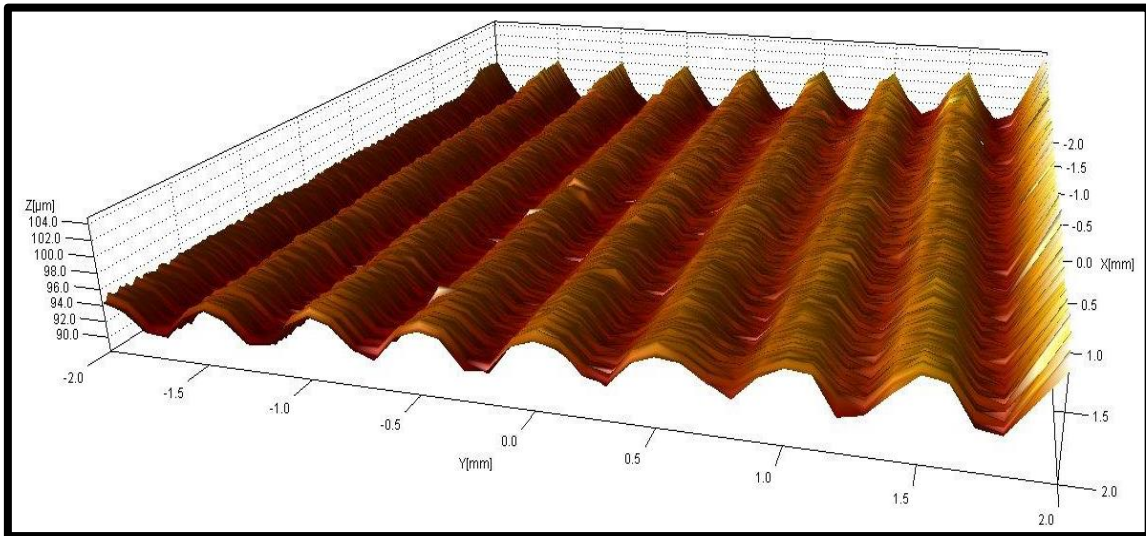


*Figura A2.9. NVABB*

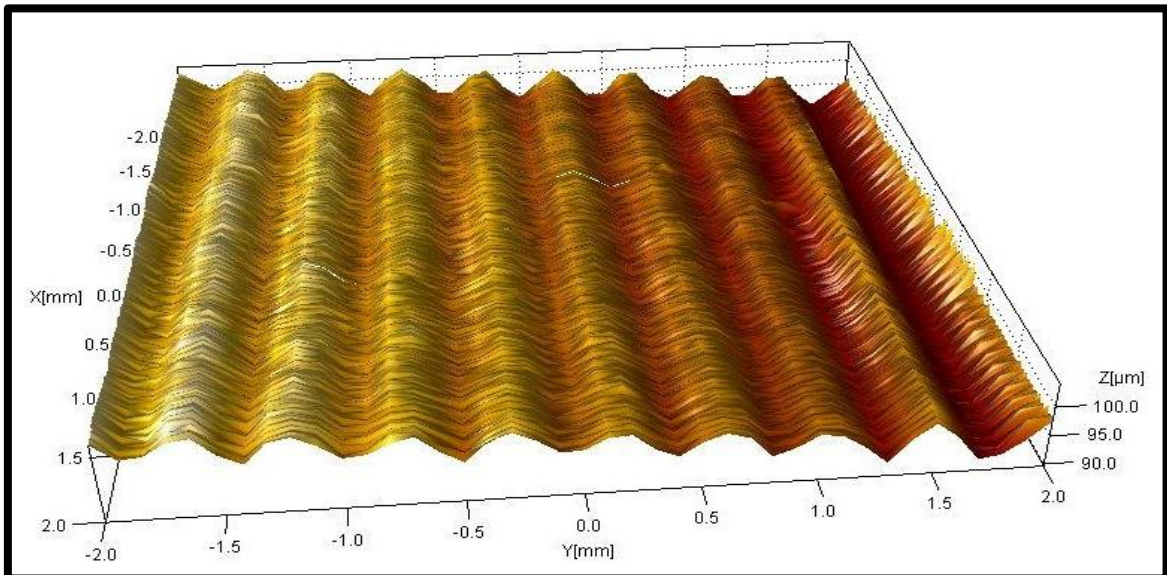


*Figura A2.10. VABB*

**EMPREMTA 18**

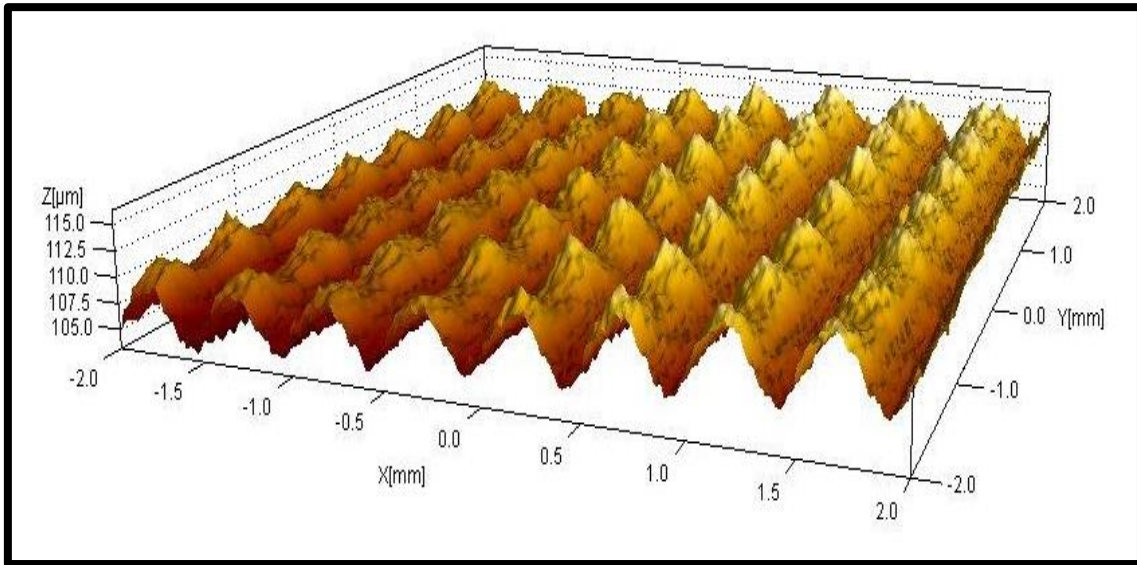


*Figura A2.11. NVABB*

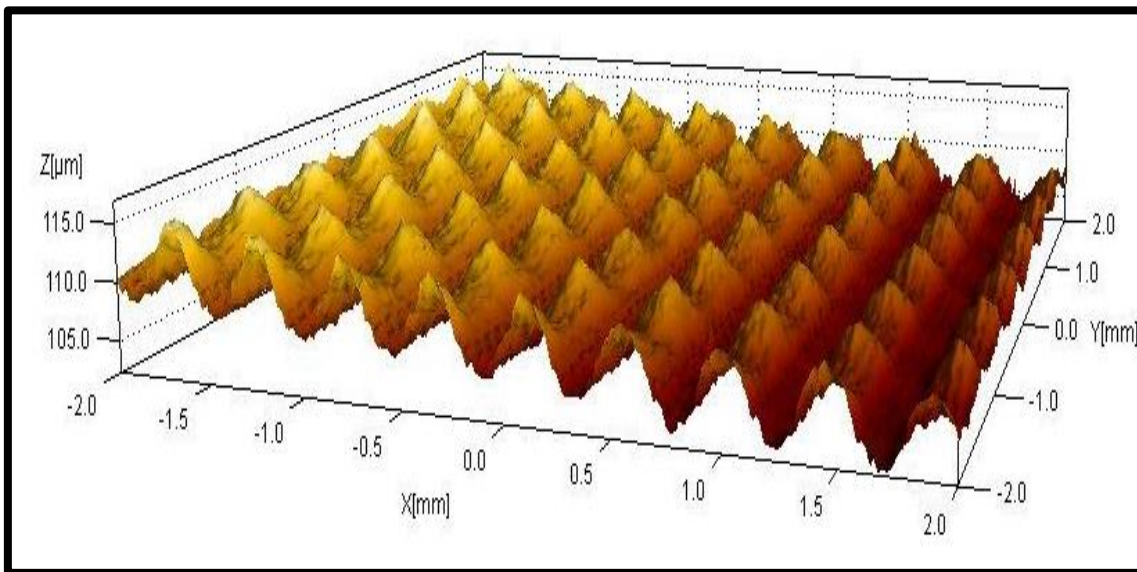


*Figura A2.12. VABB*

**EMPREMTA 21**



*Figura A2.13. NVABB*



*Figura A2.14. VABB*

**EMPREMTA 23**

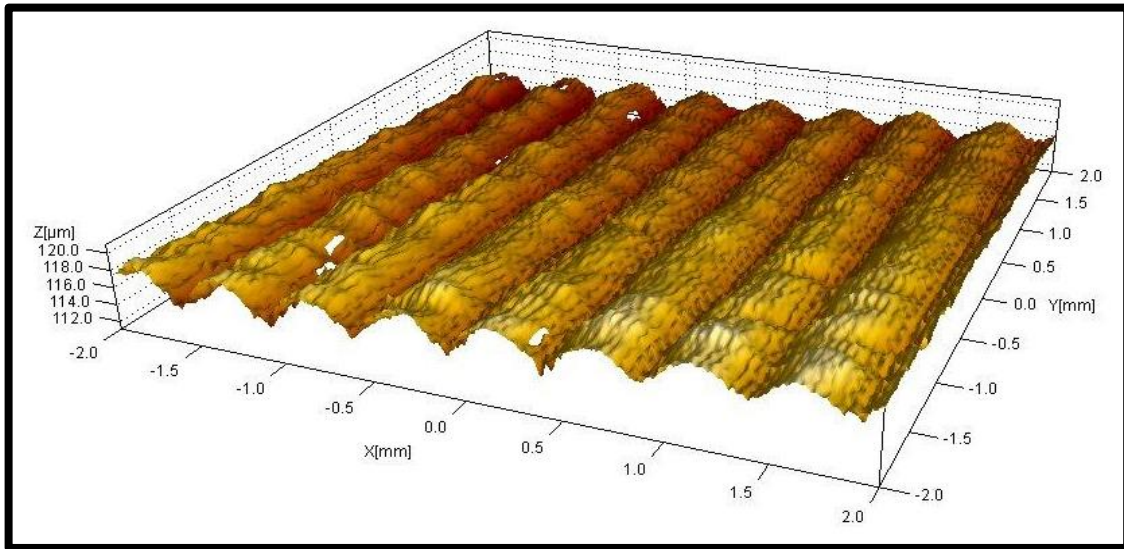


Figura A2.15. NVABB

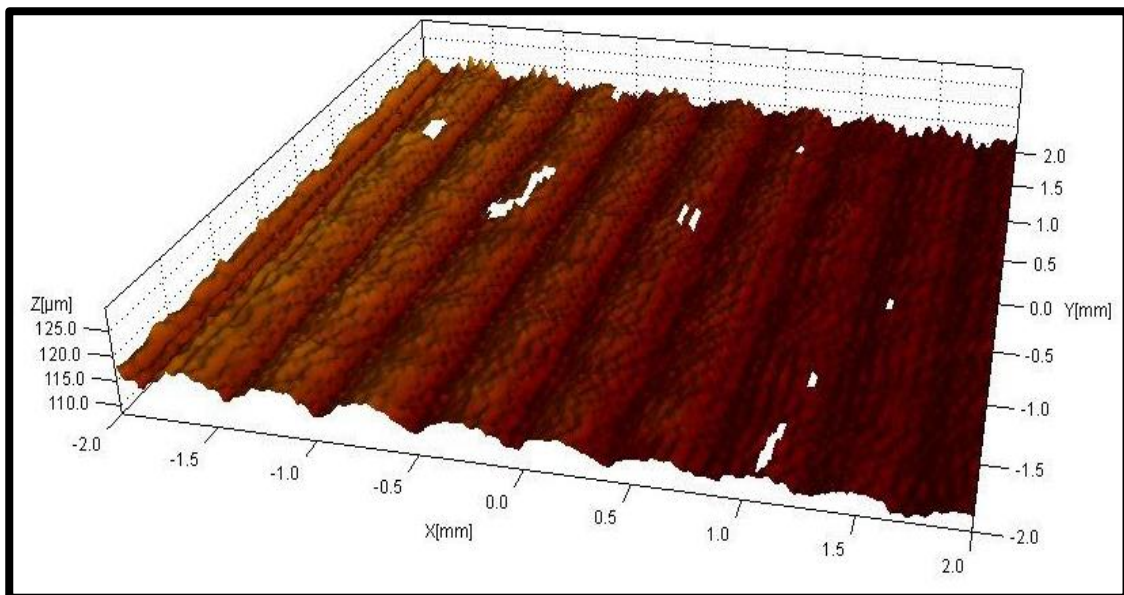
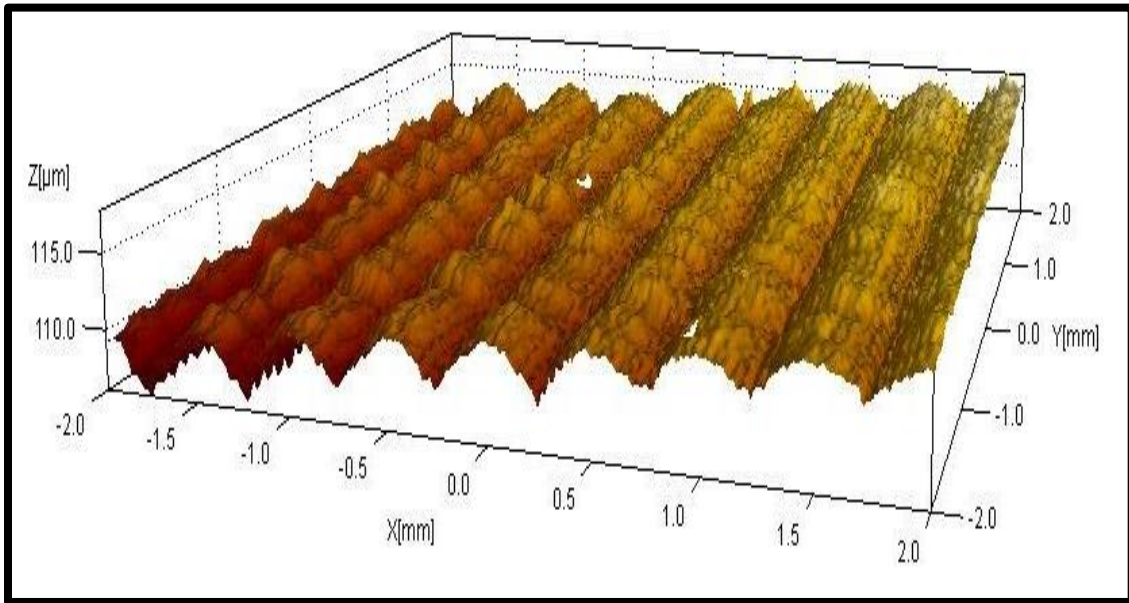
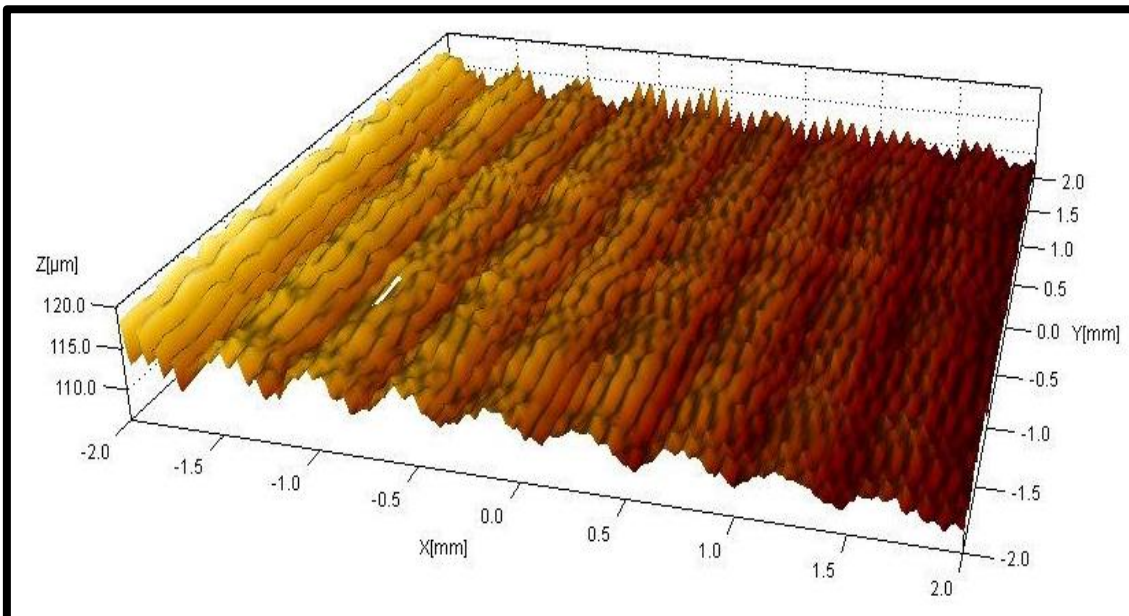


Figura A2.16. VABB

**EMPREMTA 25**



*Figura A2.17. NVABB*



*Figura A2.18. VABB*

## Superfície 2 - Dreta

### EMPREMTA 2

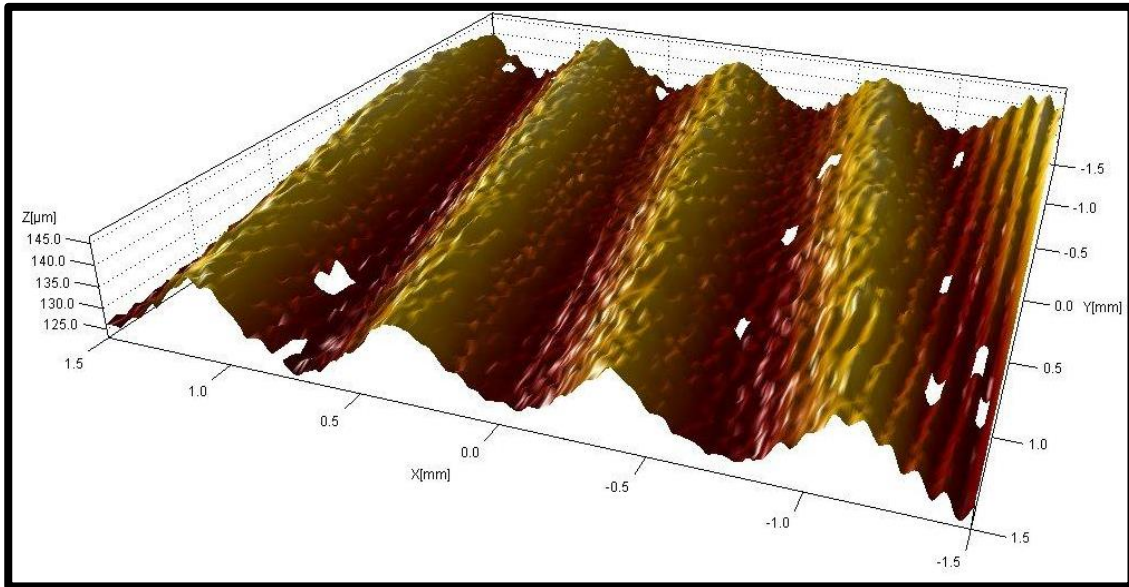


Figura A2.19. NVABB

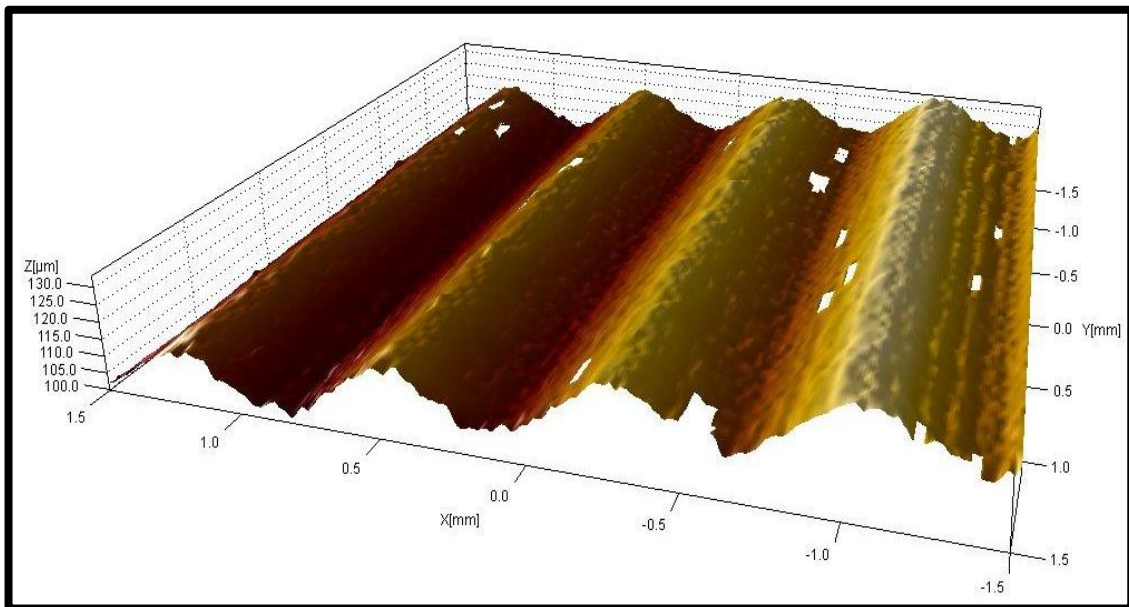


Figura A2.20. VABB

**EMPREMTA 4**

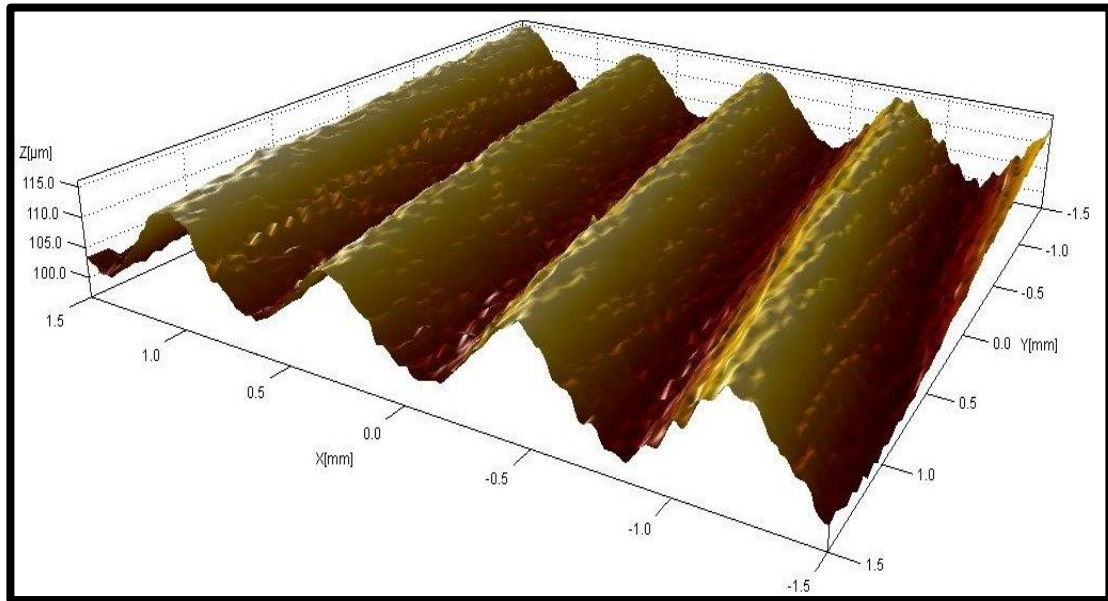


Figura A2.21. NVABB

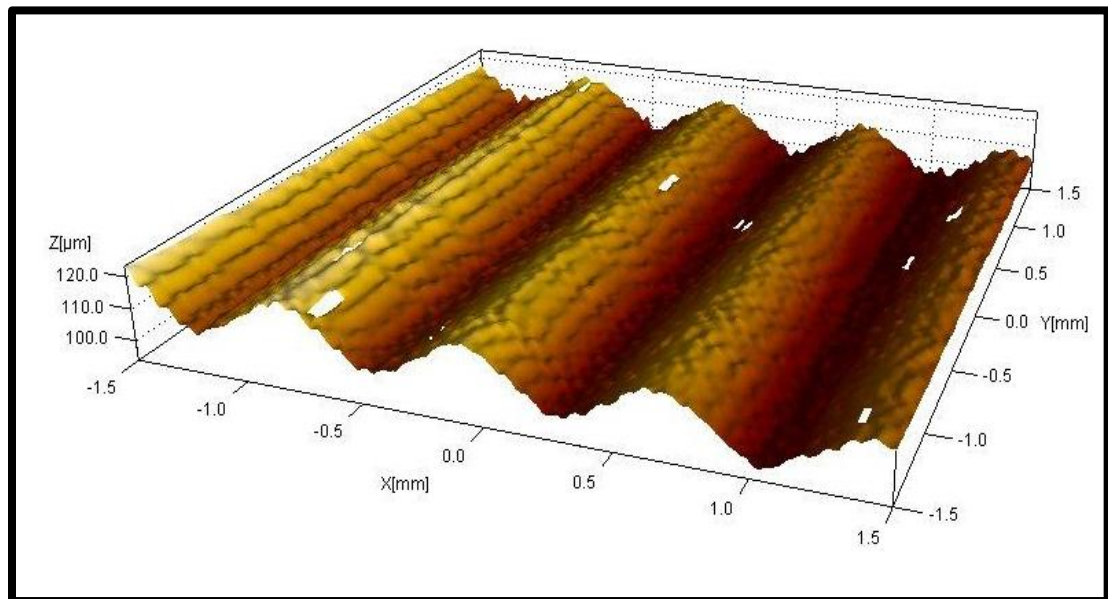


Figura A2.22. VABB



**EMPREMTA 9**

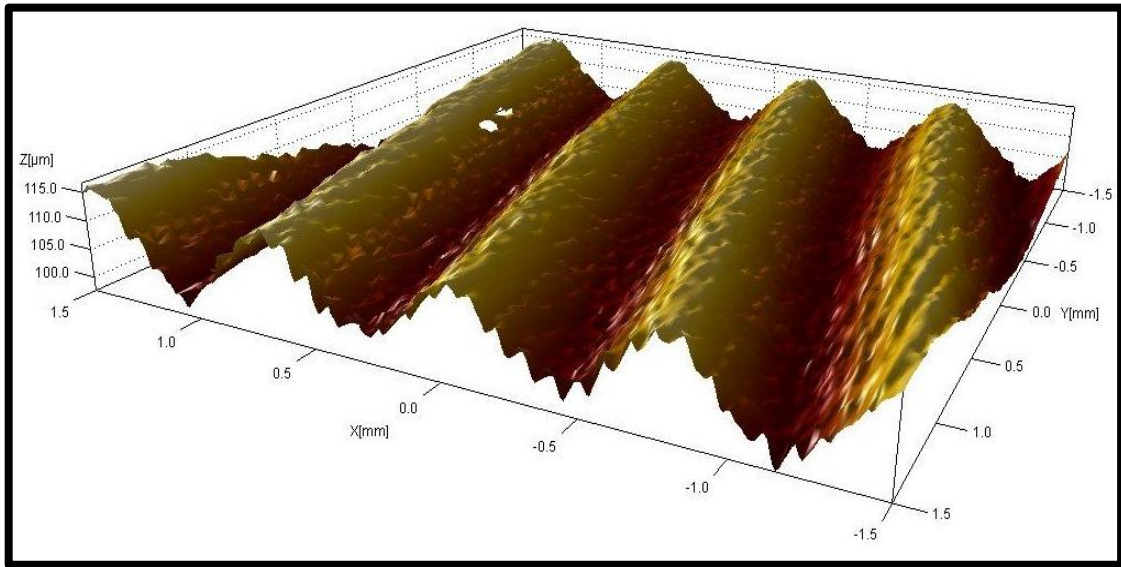


Figura A2.23. NVABB

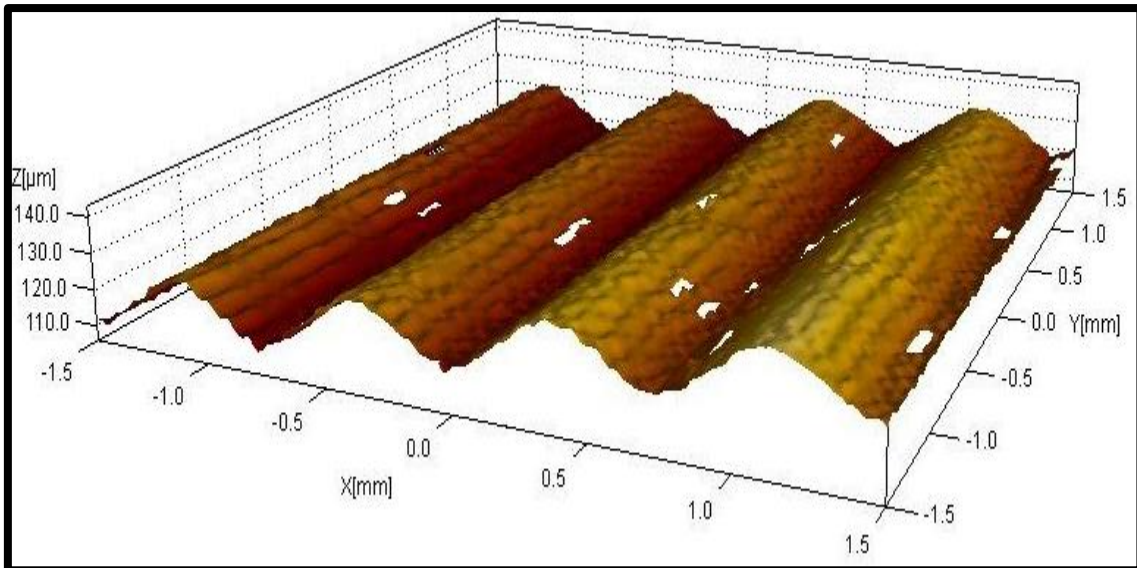


Figura A2.24. VABB

**EMPREMTA 12**

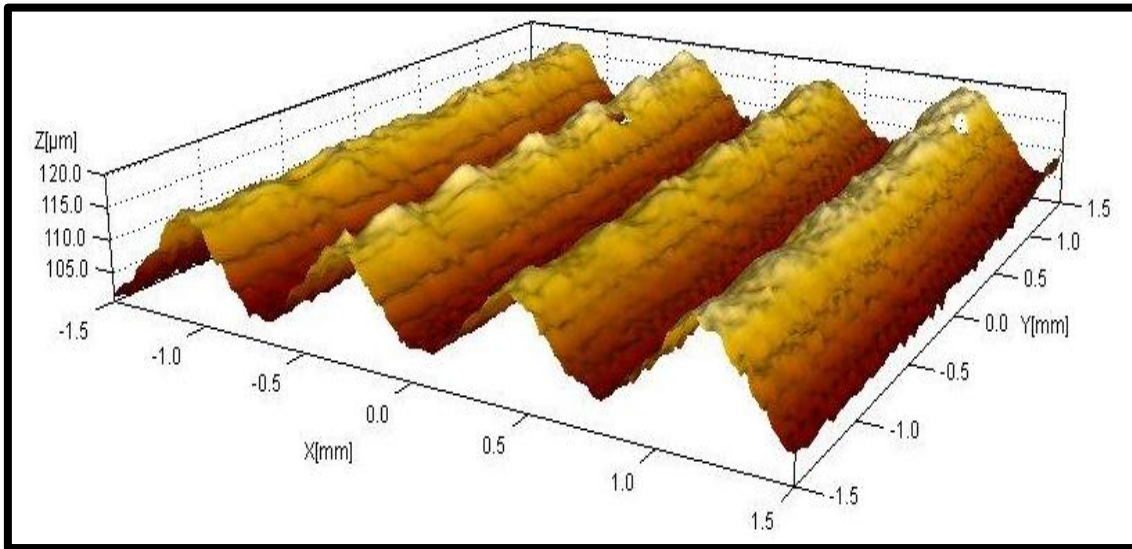


Figura A2.25. NVABB

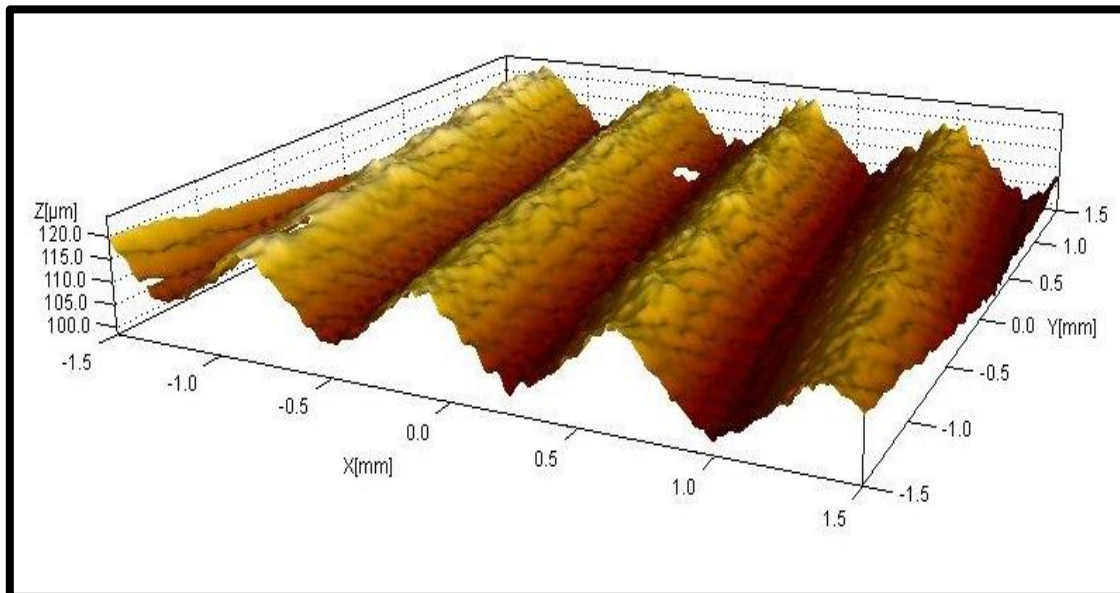


Figura A2.26. VABB

**EMPREMTA 14**

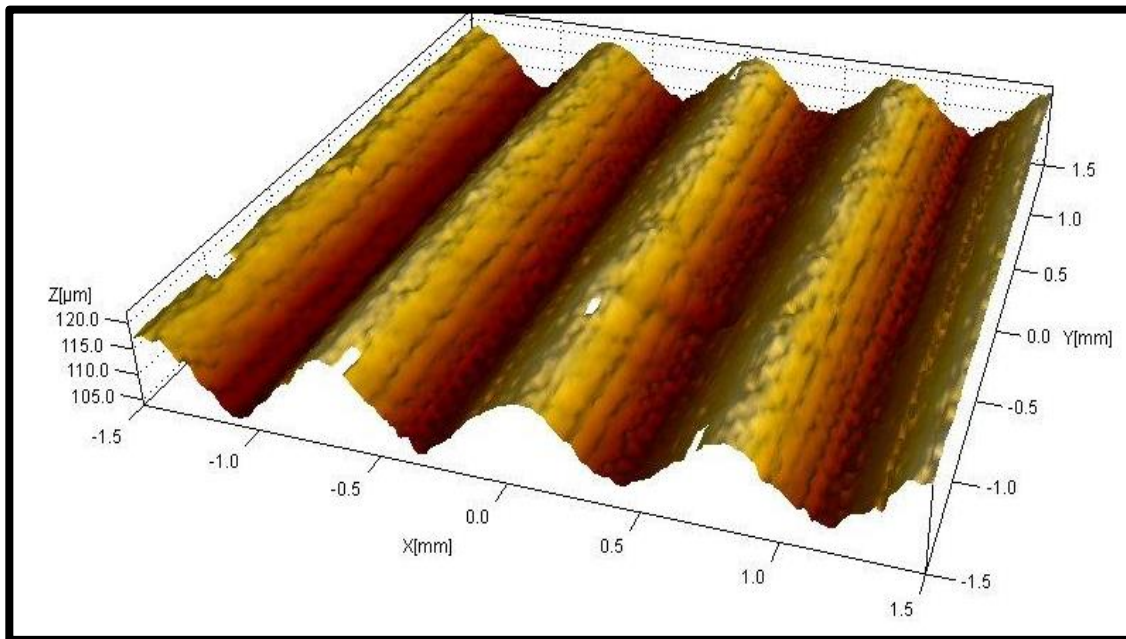


Figura A2.27. NVABB

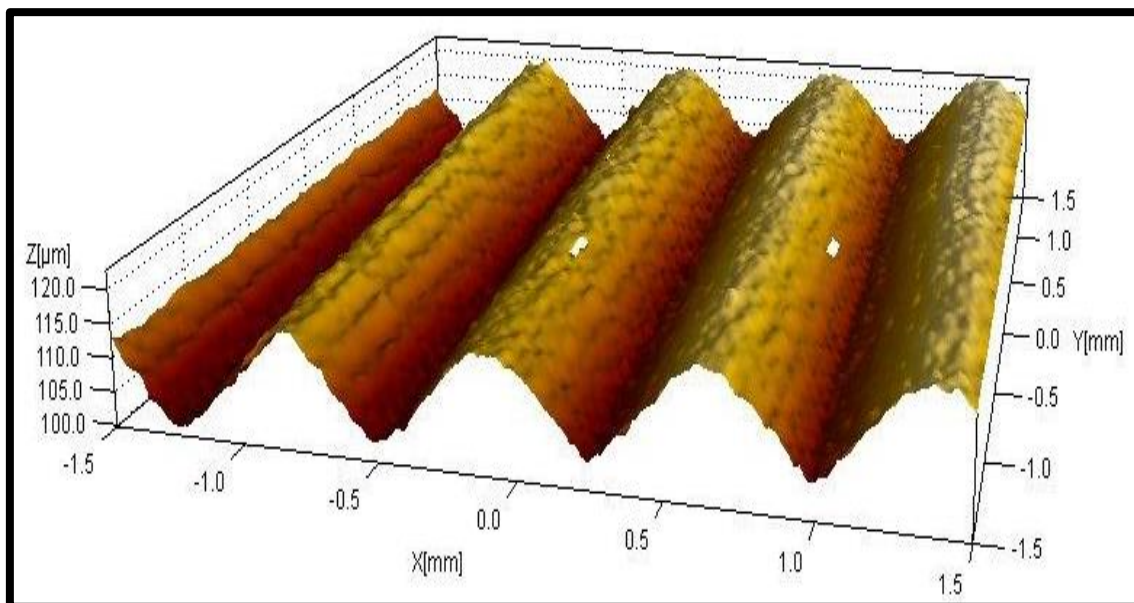
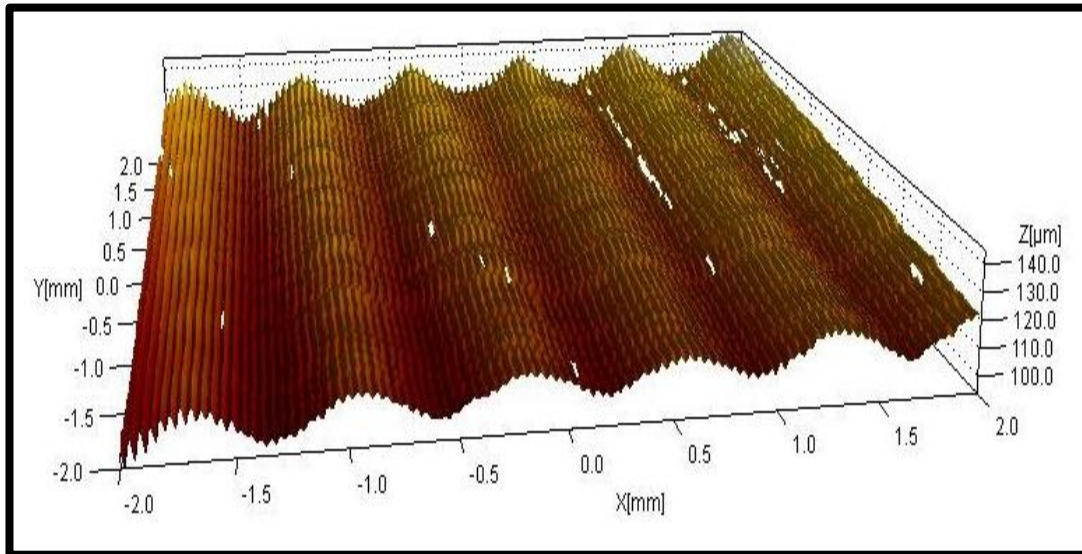
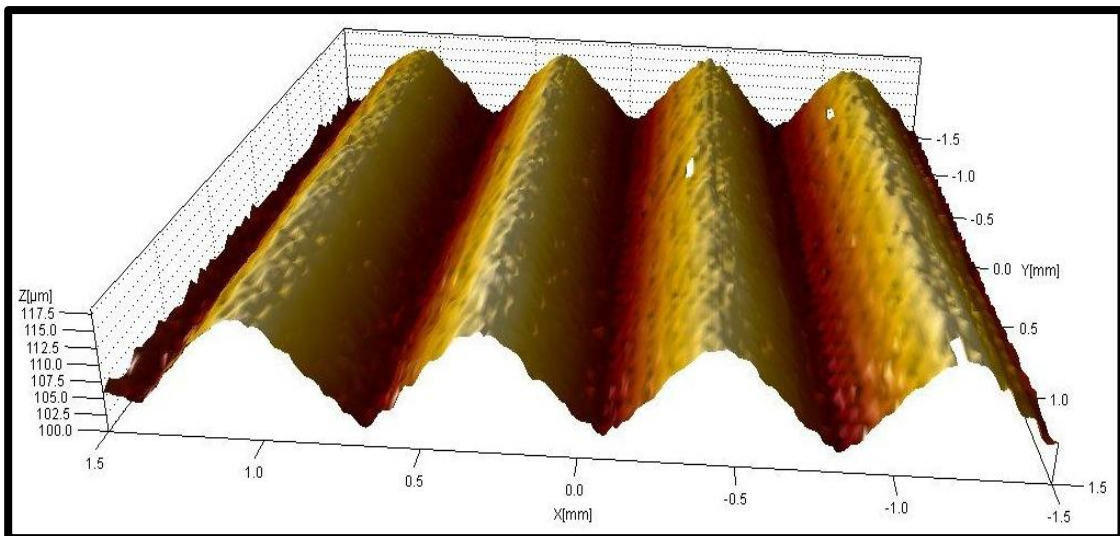


Figura A2.28. VABB

**EMPREMTA 16**

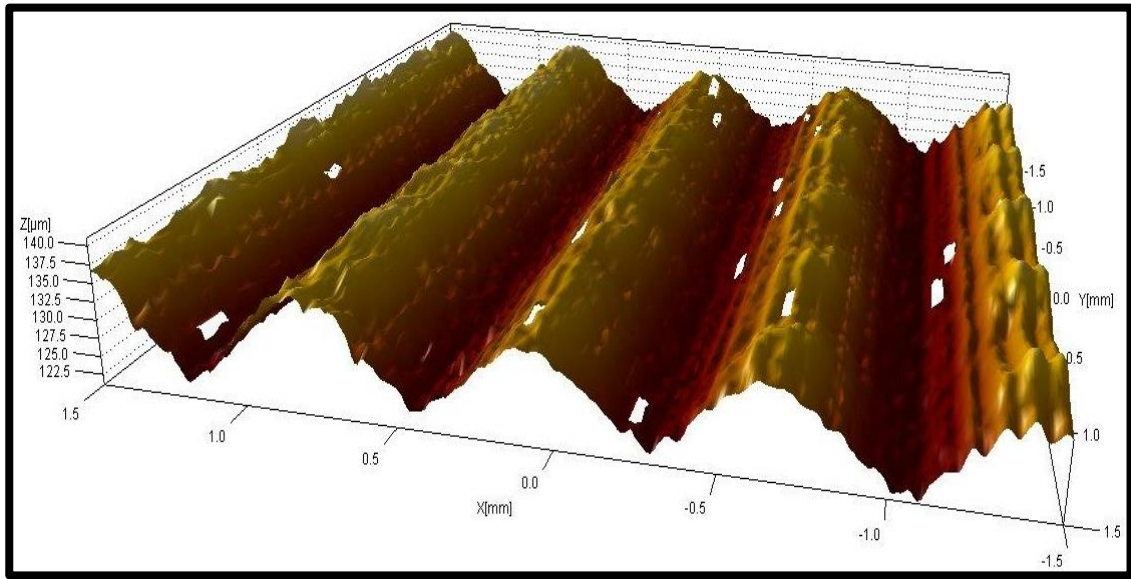


*Figura A2.29. NVABB*

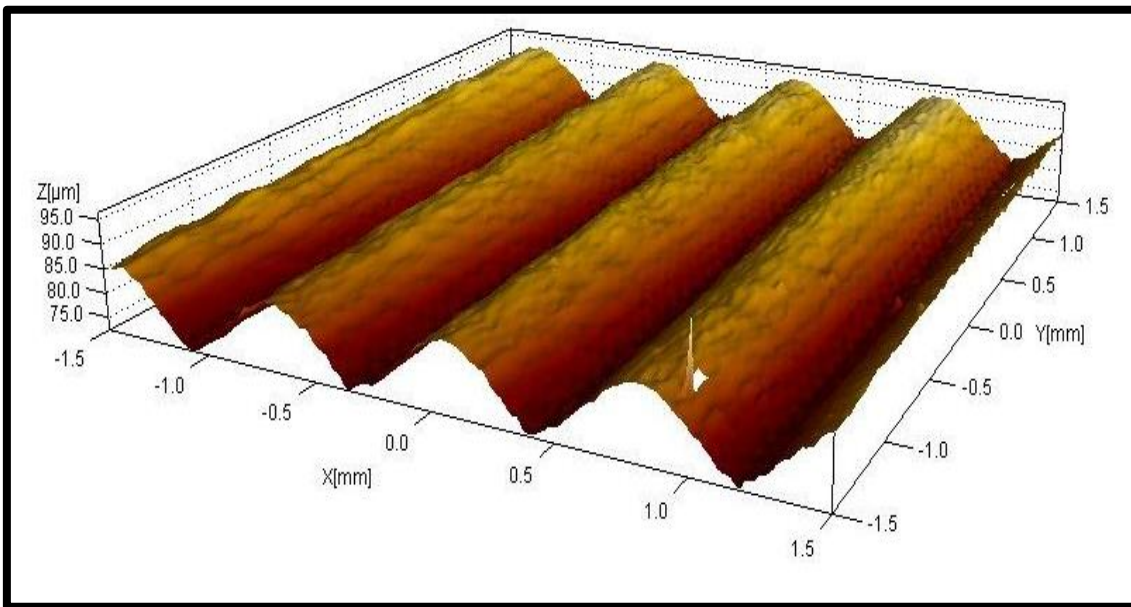


*Figura A2.30. VABB*

**EMPREMTA 19**

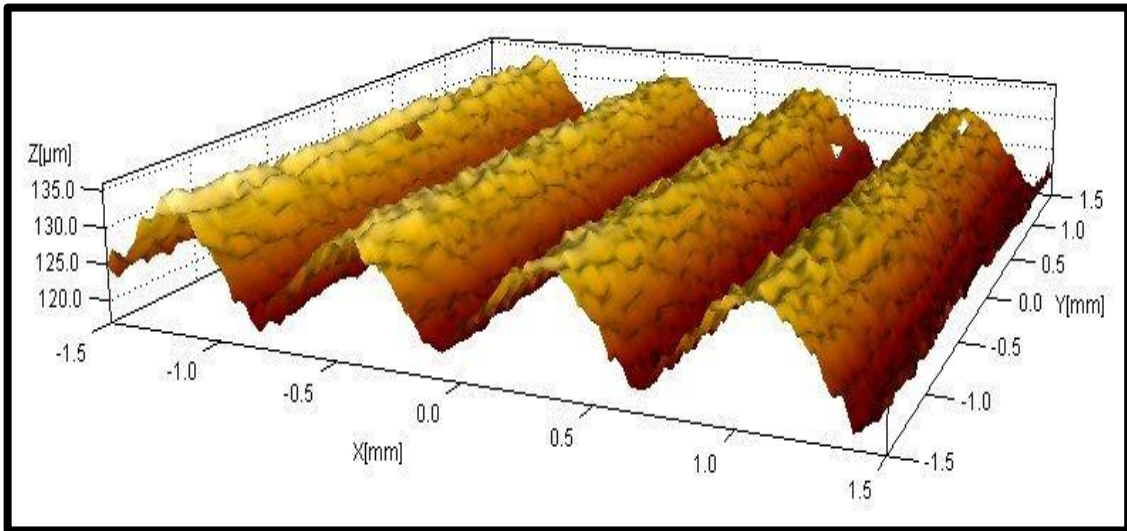


*Figura A2.31. NVABB*

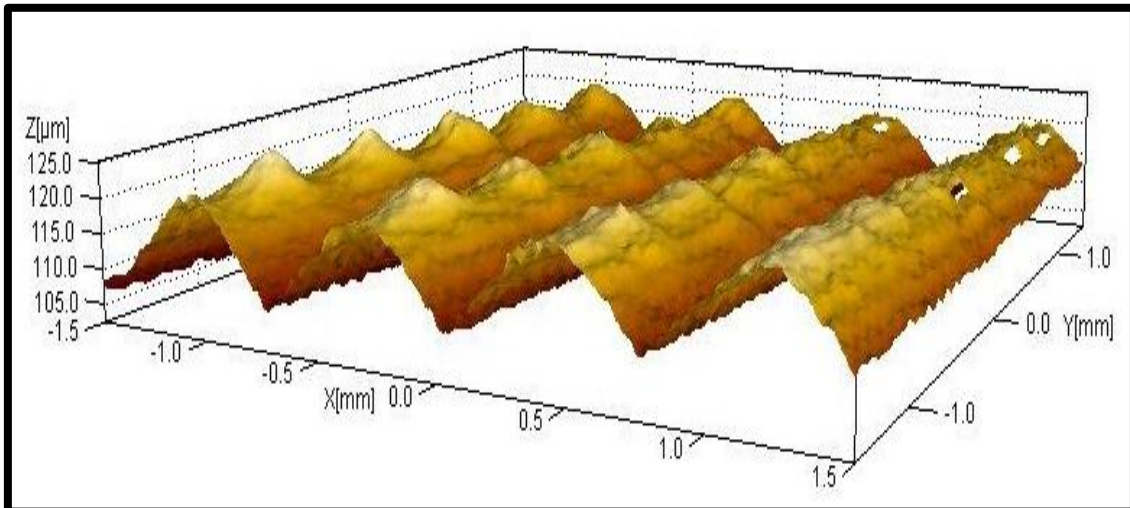


*Figura A2.32. VABB*

**empremta 24**

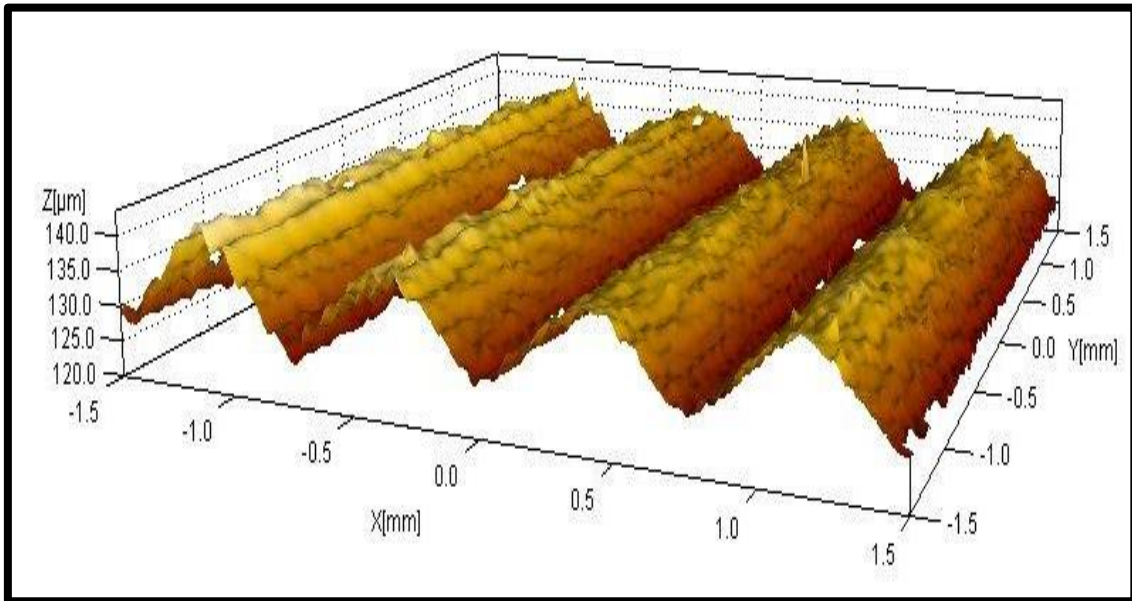


*Figura A2.33. NVABB*

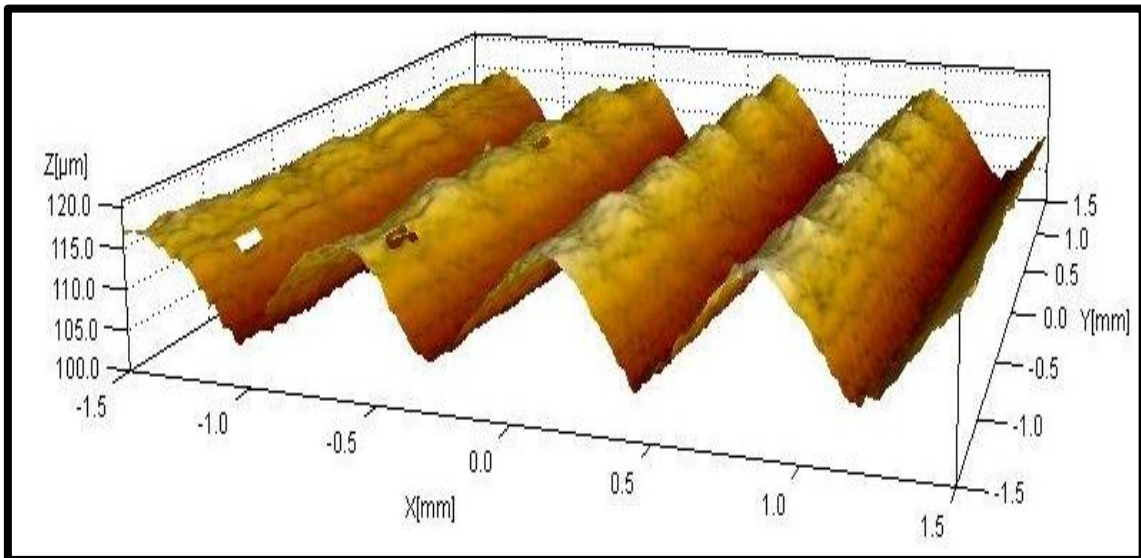


*Figura A2.34. VABB*

**EMPREMTA 26**



*Figura A2.35. NVABB*



*Figura A2.36. VABB*

## Superfície 3 - Mig

### EMPREMTA 3

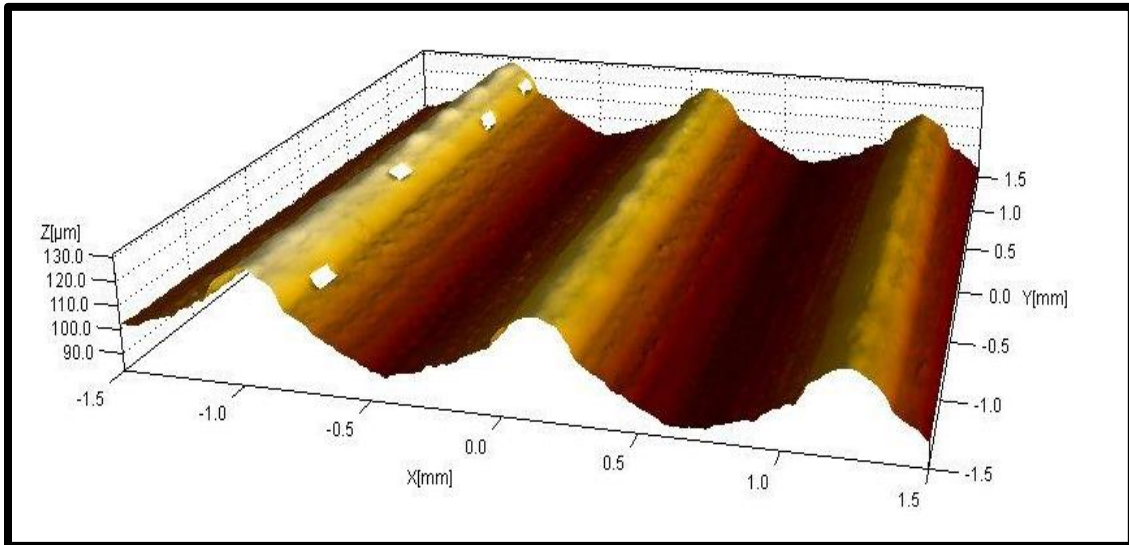


Figura A2.37. NVABB

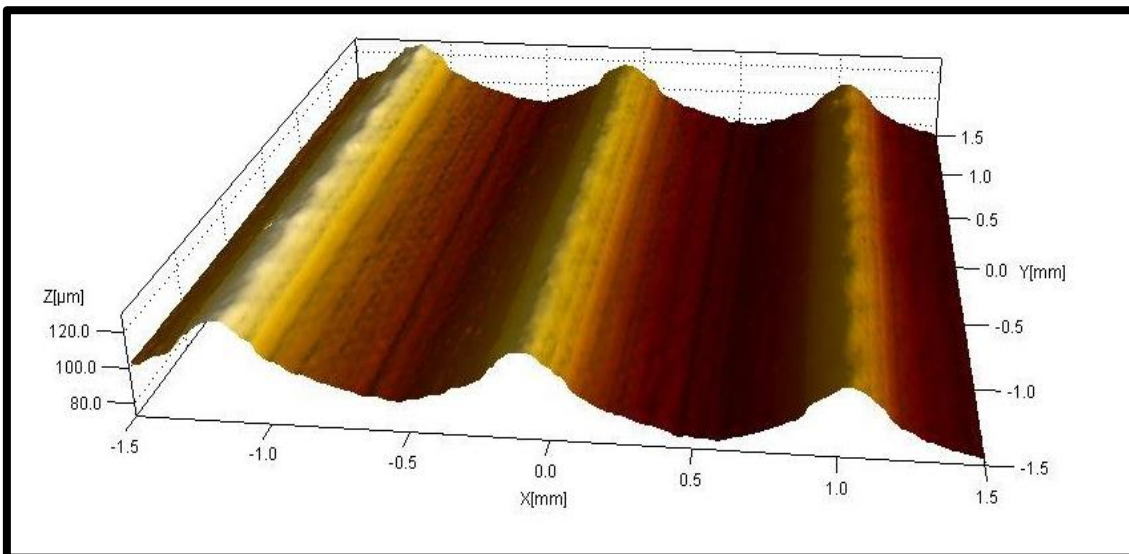
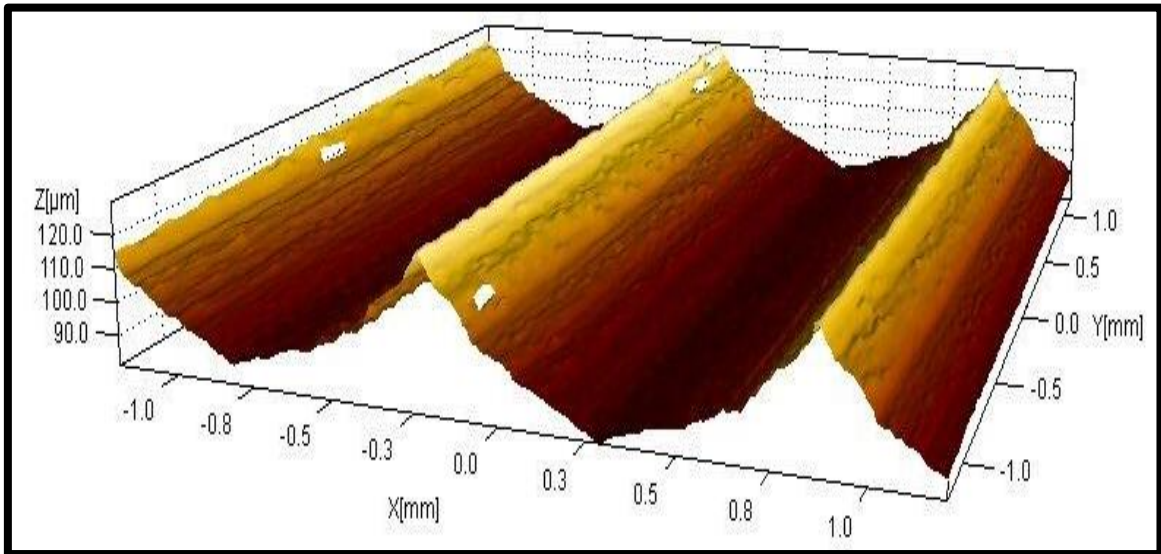


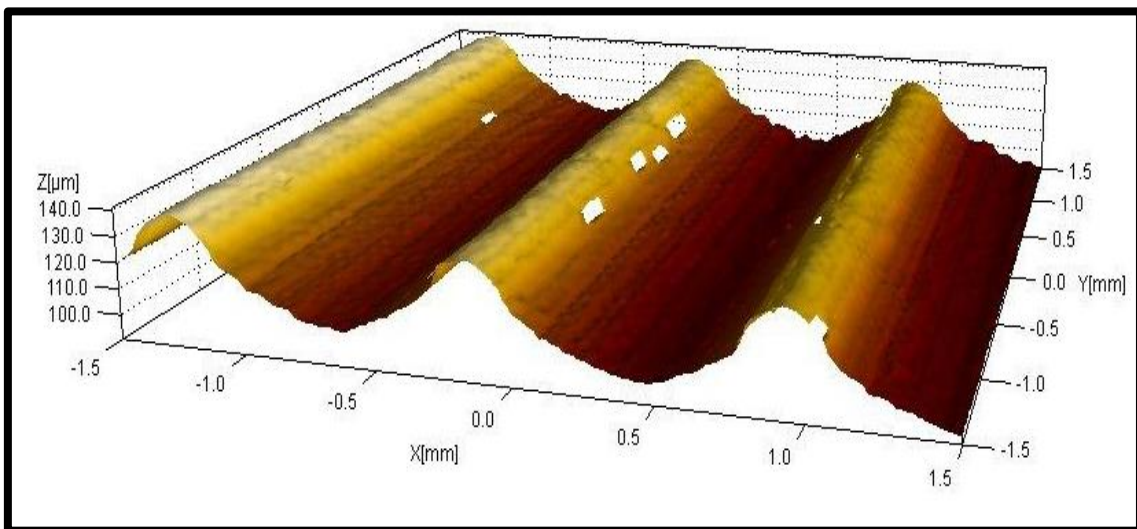
Figura A2.38. VABB



**EMPREMTA 5**



*Figura A2.39. NVABB*



*Figura A2.40. VABB*

**EMPREMTA 7**

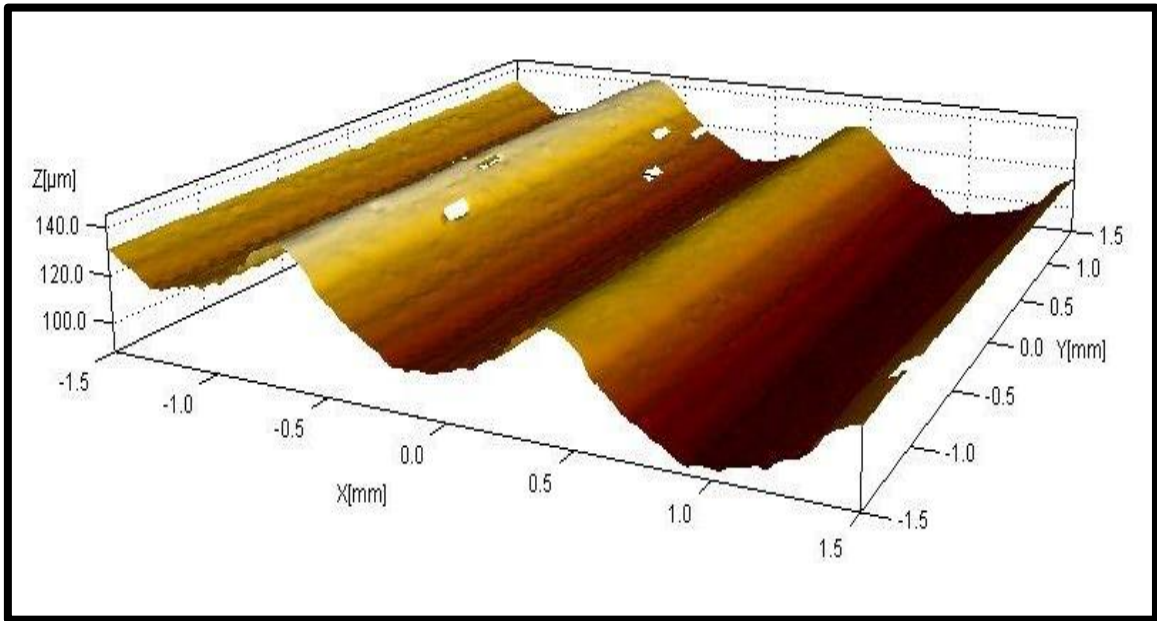


Figura A2.41. NVABB

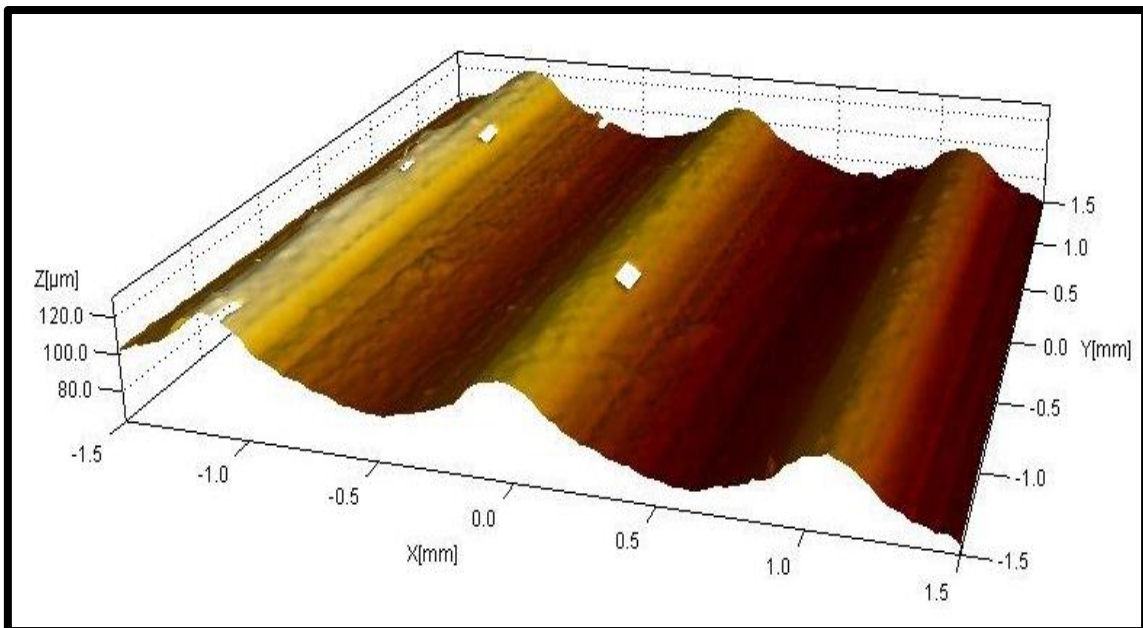


Figura A2.42. VABB

**EMPREMTA 10**

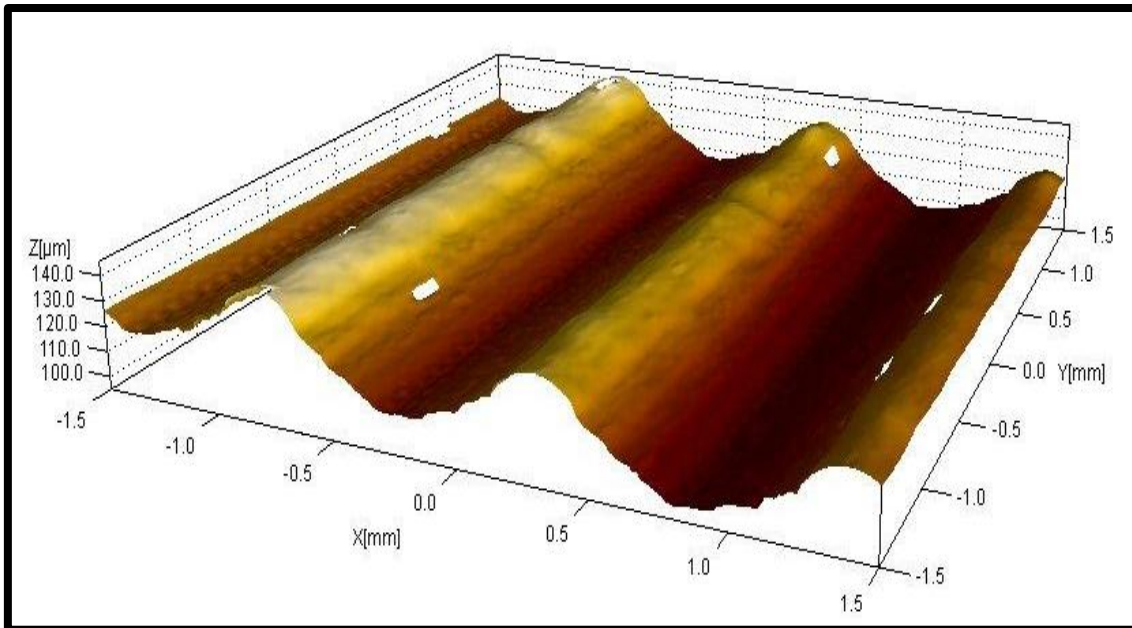


figura A2.43.NVABB

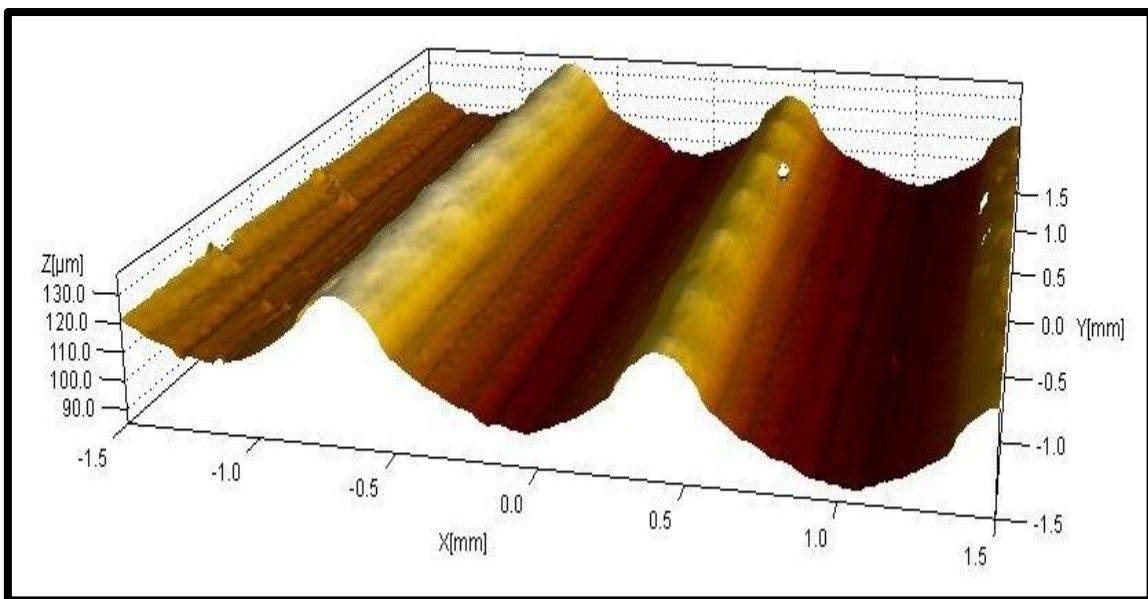
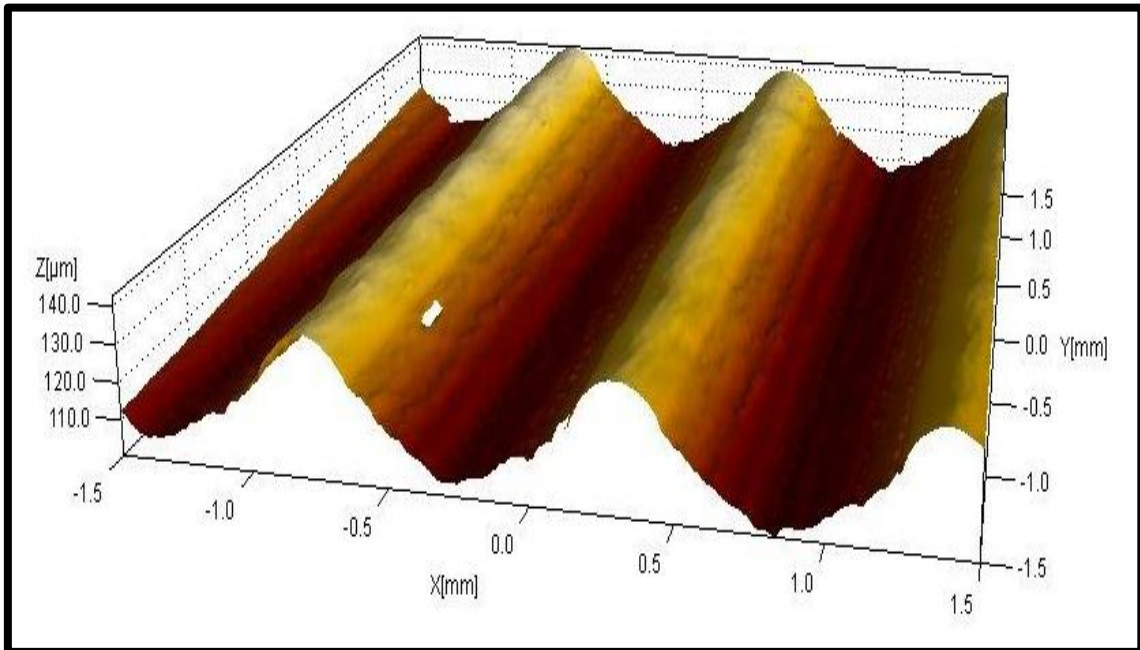
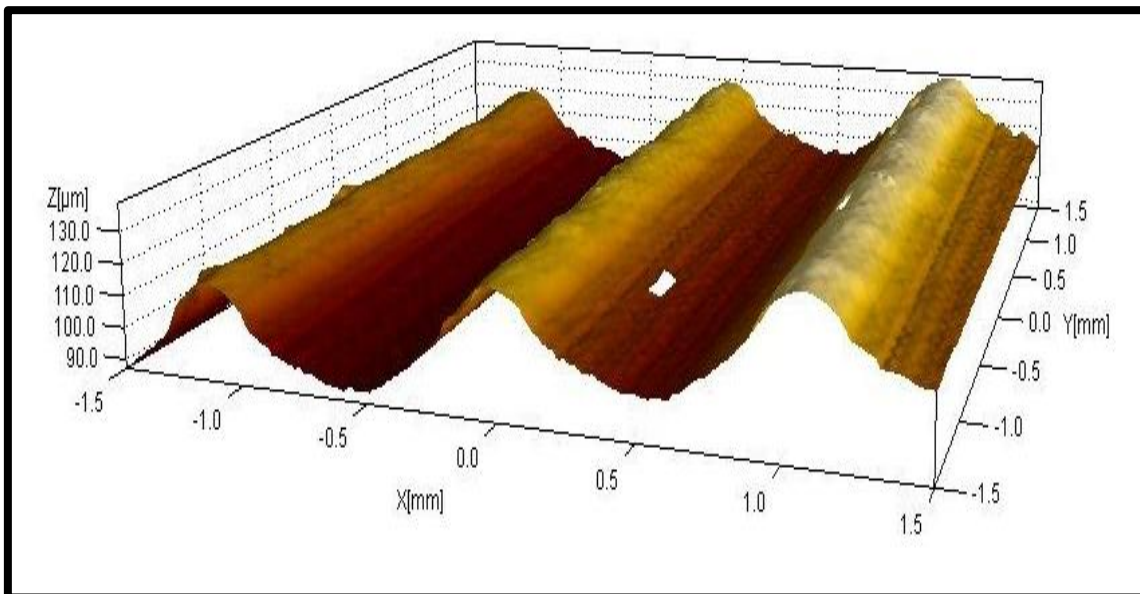


Figura A2.44. VABB

**EMPREMTA 15**

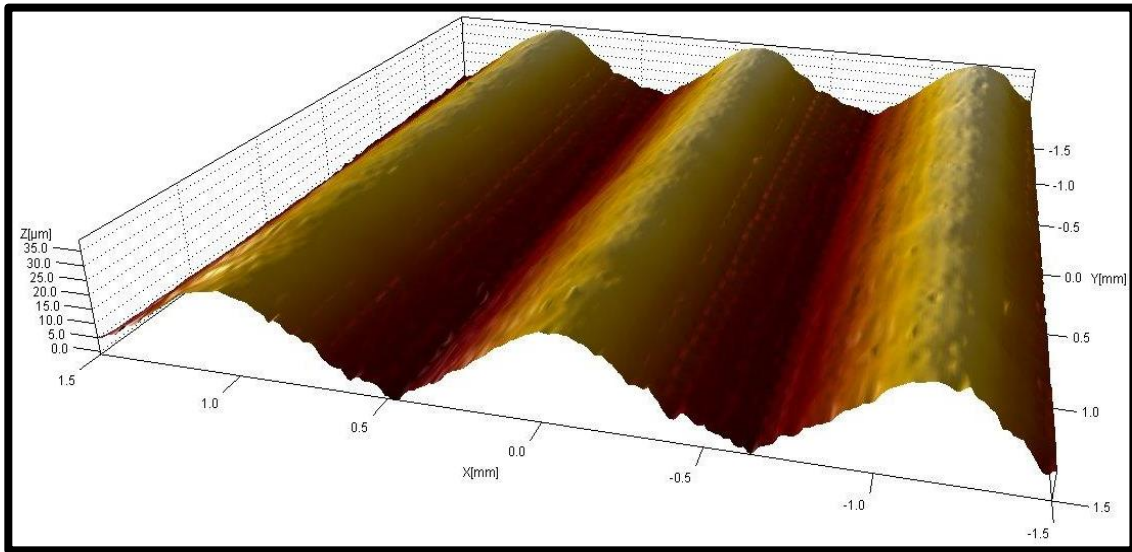


*Figura A2.45. NVABB*

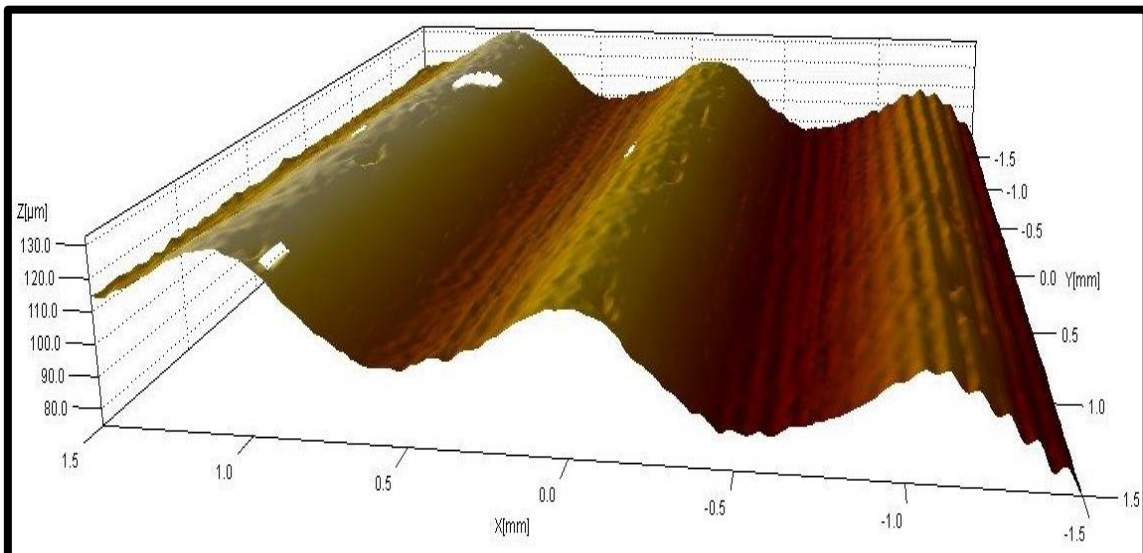


*Figura A2.46. VABB*

**EMPREMTA 17**

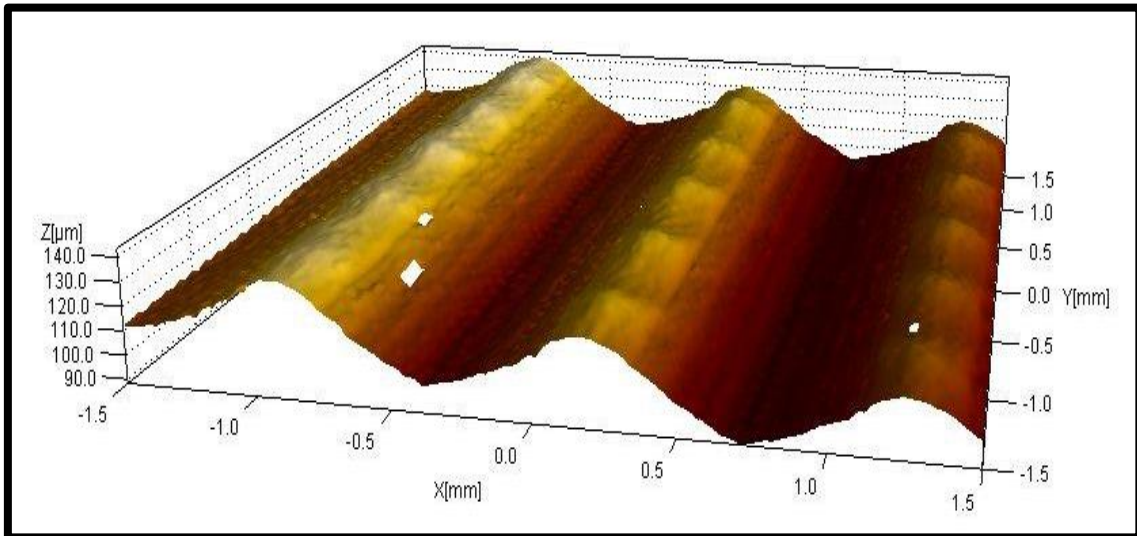


*Figura A2.47. NVABB*

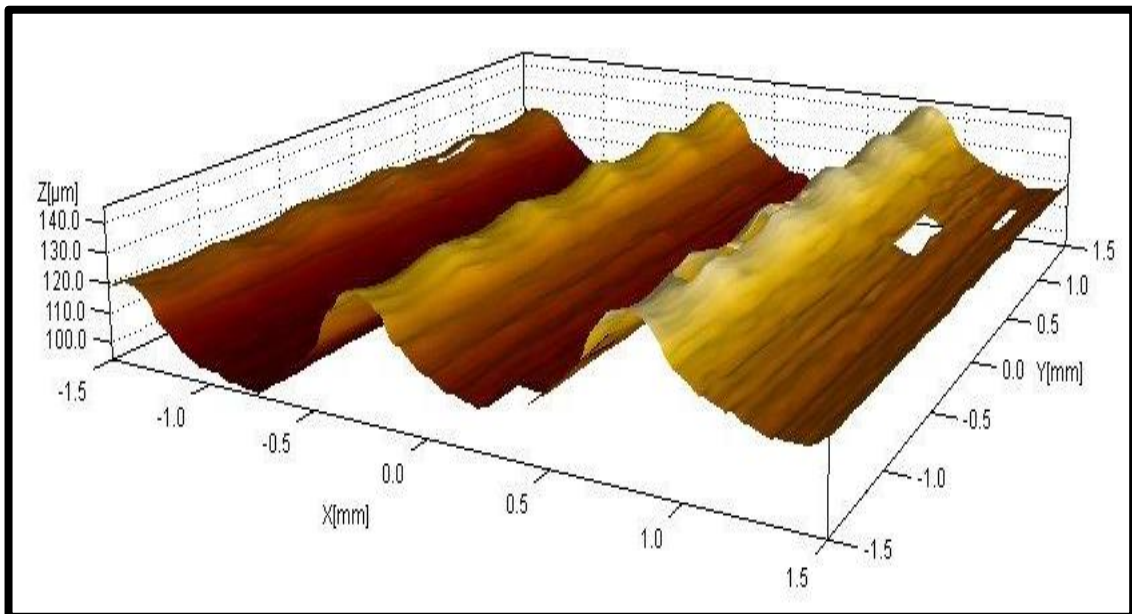


*Figura A2.48. VABB*

**EMPREMTA 20**

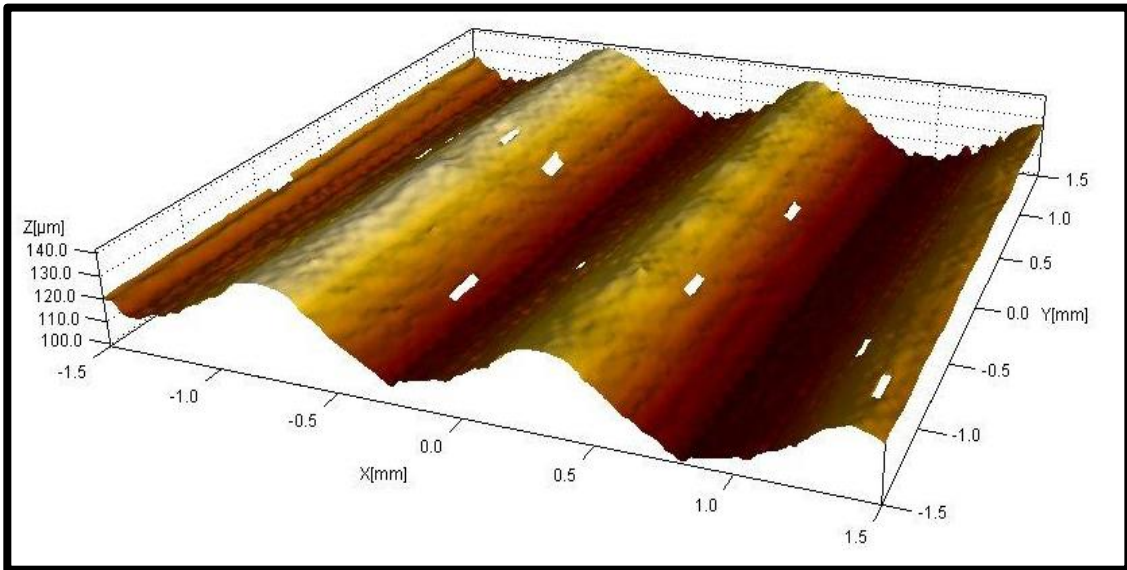


*Figura A2.49. NVABB*

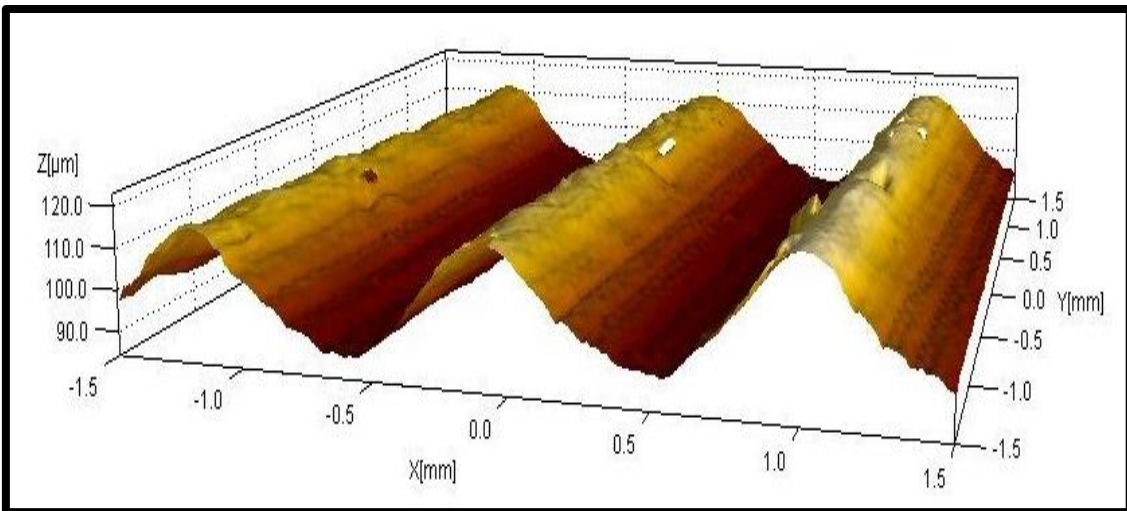


*Figura A2.50. VABB*

**EMPREMTA 22**

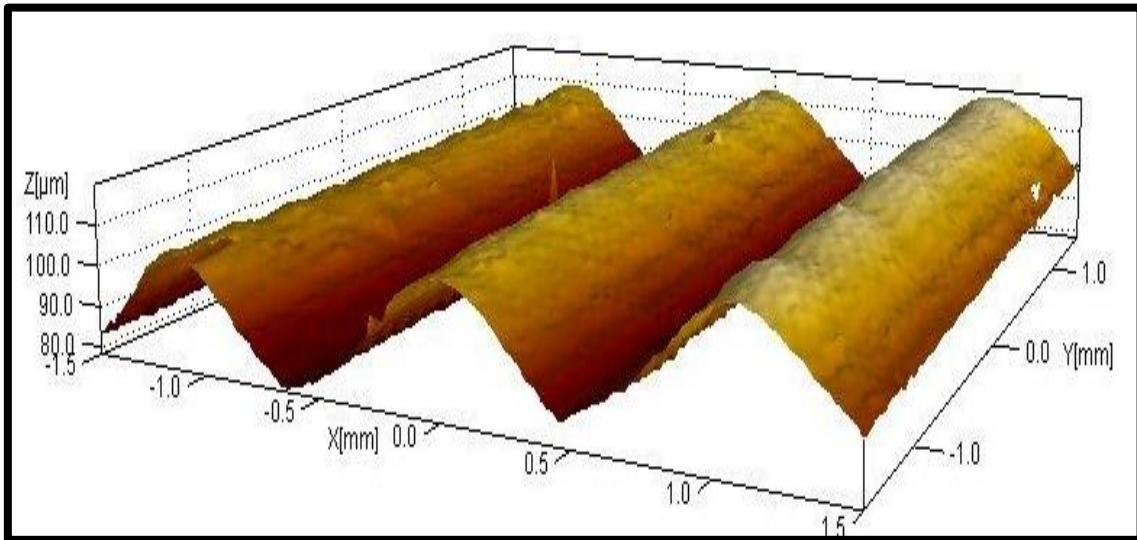


*Figura A2.51. NVABB*

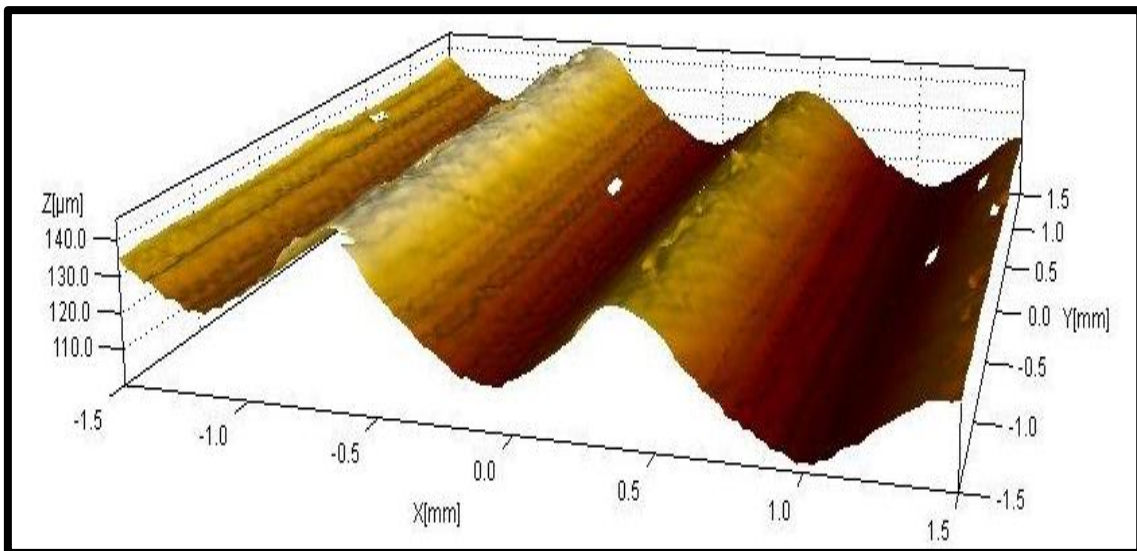


*Figura A2.52. VABB*

**EMPREMTA 27**



*Figura A2.53. NVABB*



*Figura A2.54. VABB*



## Annex A3. Càlculs ANOVA per a cada variable

### Càlculs ANOVA per Sq

#### ANOVA unidireccional: Sq vs. F

Font GL SC MC FP  
 F 2 2,5 1,3 0,09 0,914  
 Error 24 338,4 14,1  
 Total 26 340,9

S = 3,755 R-quad. = 0,74% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
150	9	5,868	3,797	2,071	9,665
300	9	5,455	3,714	1,741	9,169
450	9	5,119	3,753	1,366	8,872

3,0 4,5 6,0 7,5

Desv.Est. agrupada = 3,755

#### ANOVA unidireccional: Sq vs. n

Font GL SC MC FP  
 n 2 1,1 0,5 0,04 0,962  
 Error 24 339,8 14,2  
 Total 26 340,9

S = 3,763 R-quad. = 0,32% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
1	9	5,739	3,775	1,964	9,514
3	9	5,452	3,847	1,605	9,300
5	9	5,251	3,664	1,587	8,915

3,0 4,5 6,0 7,5

Desv.Est. agrupada = 3.763

#### ANOVA unidireccional: Sq vs. Vf

Font GL SC MC FP  
 Vf 2 0,0 0,0 0,00 0,999  
 Error 24 340,9 14,2  
 Total 26 340,9

S = 3,769 R-quad. = 0,01% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
300	9	5,450	3,814	1,636	9,264
600	9	5,471	3,781	1,690	9,252
900	9	5,521	3,710	1,811	9,231

3,0 4,5 6,0 7,5

Desv.Est. agrupada = 3,769

**ANOVA unidireccional: Sq vs. S0**

Font GL SC MC FP  
 S0 2 335,839 167,920 794,33 0,000  
 Error 24 5,074 0,211  
 Total 26 340,913

S = 0,4598 R-quad. = 98,51% R-quad. (Ajustada) = 98,39%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
1	9	1,843	0,516	(* -)	
2	9	4,344	0,205	(* -)	
3	9	10,255	0,571	(*)	

----- + ----- + ----- + ----- + -----  
 2,5 5,0 7,5 10,0

Desv.Est. agrupada = 0,460

**ANOVA unidireccional: Sq vs. S**

Font GL SC MC FP  
 S 2 0,1 0,0 0,00 0,998  
 Error 24 340,9 14,2  
 Total 26 340,9

S = 3,769 R-quad. = 0,02% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
bn90	9	5,430	3,793	(----- * -----)	
bn90 / 0	9	5,542	3,730	(----- * -----)	
nb0	9	5,470	3,783	(----- * -----)	

- + ----- + ----- + ----- + -----  
 3,0 4,5 6,0 7,5

Desv.Est. agrupada = 3,769



**ANOVA unidireccional: Ssk vs. S0**

Font GL SC MC FP  
 S0 2 0,9936 0,4968 14,16 0,000  
 Error 24 0,8421 0,0351  
 Total 26 1,8357

S = 0,1873 R-quad. = 54,13% R-quad. (Ajustada) = 50,31%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	----- + ----- + ----- + ----- + ---
1	9	-0,1894	0,1722	(----- * -----)
2	9	-0,0123	0,1164	(----- * -----)
3	9	0,2761	0,2491	(----- * -----)
				----- + ----- + ----- + ----- + ---
				-0,20 0,00 0,20 0,40

Desv.Est. agrupada = 0,1873

**ANOVA unidireccional: Ssk vs. S**

Font GL SC MC FP  
 S 2 0,0474 0,0237 0,32 0,731  
 Error 24 1,7883 0,0745  
 Total 26 1,8357

S = 0,2730 R-quad. = 2,58% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	----- + ----- + ----- + ----- + ---
bn0	9	-0,0030	0,2729	(----- * -----)
bn90 /	0 9	0,0840	0,2483	(----- * -----)
nb0	9	-0,0066	0,2957	(----- * -----)
				----- + ----- + ----- + ----- + ---
				-0,12 0,00 0,12 0,24

Desv.Est. agrupada = 0,2730

## Càlculs ANOVA per Sku

### ANOVA unidireccional: Sku vs. F

Font GL SC MC FP  
 F 2 0,2773 0,1386 1,76 0,193  
 Error 24 1,8861 0,0786  
 Total 26 2,1634

S = 0,2803 R-quad. = 12,82% R-quad. (Ajustada) = 5,55%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
150	9	1,8322	0,2425	(----- * -----)	(----- * -----)
300	9	1,7291	0,0808	(----- * -----)	(----- * -----)
450	9	1,9762	0,4128	(----- * -----)	(----- * -----)
				----- + ----- + ----- + ----- + -----	
				1,60	1,76 1,92 2,08

Desv.Est. agrupada = 0,2803

### ANOVA unidireccional: Sku vs. n

Font GL SC MC FP  
 n 2 0,0339 0,0170 0,19 0,827  
 Error 24 2,1295 0,0887  
 Total 26 2,1634

S = 0,2979 R-quad. = 1,57% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
1	9	1,7957	0,1086	(----- * -----)	(----- * -----)
3	9	1,8711	0,3372	(----- * -----)	(----- * -----)
5	9	1,8707	0,3751	(----- * -----)	(----- * -----)
				----- + ----- + ----- + ----- + -----	
				1,65	1,80 1,95 2,10

Desv.Est. agrupada = 0,2979

### ANOVA unidireccional: Sku vs. Vf

Font GL SC MC FP  
 Vf 2 0,1188 0,0594 0,70 0,508  
 Error 24 2,0446 0,0852  
 Total 26 2,1634

S = 0,2919 R-quad. = 5,49% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	IC Inferior	IC Superior
300	9	1,8939	0,3591	(----- * -----)	(----- * -----)
600	9	1,8915	0,3255	(----- * -----)	(----- * -----)
900	9	1,7520	0,1438	(----- * -----)	(----- * -----)
				----- + ----- + ----- + ----- + -----	
				1,65	1,80 1,95 2,10

Desv.Est. agrupada = 0,2919

**ANOVA unidireccional: Sku vs. S0**

Font GL SC MC FP  
 S0 2 0,1643 0,0822 0,99 0,388  
 Error 24 1,9991 0,0833  
 Total 26 2,1634

S = 0,2886 R-quad. = 7,60% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	----- + ----- + ----- + ----- + -
1	9	1,9379	0,4366	(----- * -----)
2	9	1,7472	0,0644	(----- * -----)
3	9	1,8524	0,2347	(----- * -----)
				----- + ----- + ----- + ----- + -
				1,65 1,80 1,95 2,10

Desv.Est. agrupada = 0,2886

**ANOVA unidireccional: Sku vs. S**

Font GL SC MC FP  
 S 2 0,0460 0,0230 0,26 0,773  
 Error 24 2,1174 0,0882  
 Total 26 2,1634

S = 0,2970 R-quad. = 2,13% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	---- + ----- + ----- + ----- + ----
bn0	9	1,8467	0,2704	(----- * -----)
bn90 / 0	9	1,7948	0,1565	(----- * -----)
nb0	9	1,8959	0,4087	(----- * -----)
				---- + ----- + ----- + ----- + ----
				1,65 1,80 1,95 2,10

Desv.Est. agrupada = 0,2970

## Càlculs ANOVA per S10z

### ANOVA unidireccional: S10z vs. F

Font GL SC MC FP  
 F 2 51 26 0,15 0,865  
 Error 24 4194 175  
 Total 26 4245

S = 13,22 R-quad. = 1,20% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	-	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----	
150	9	23,01	14,40	(-----	*	-----)							
300	9	20,28	12,69	(-----	*	-----)							
450	9	19,93	12,48	(-----	*	-----)							
					-	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----
					12,0	18,0	24,0	30,0					

Desv.Est. agrupada = 13,22

### ANOVA unidireccional: S10z vs. n

Font GL SC MC FP  
 n 2 35 17 0,10 0,905  
 Error 24 4210 175  
 Total 26 4245

S = 13,25 R-quad. = 0,82% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	---	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----	
1	9	22,37	12,91	(-----	*	-----)							
3	9	21,25	14,66	(-----	*	-----)							
5	9	19,60	12,03	(-----	*	-----)							
					---	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----
					12,0	18,0	24,0	30,0					

Desv.Est. agrupada = 13,25

### ANOVA unidireccional: S10z vs. Vf

Font GL SC MC FP  
 Vf 2 5 2 0,01 0,987  
 Error 24 4241 177  
 Total 26 4245

S = 13,29 R-quad. = 0,11% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	-----	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----	
300	9	21,07	12,83	(-----	*	-----)							
600	9	21,59	14,30	(-----	*	-----)							
900	9	20,56	12,69	(-----	*	-----)							
					-----	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----
					15,0	20,0	25,0	30,0					

Desv.Est. agrupada = 13,29

**ANOVA unidireccional: S10z vs. S0**

Font GL SC MC FP  
 S0 2 4061,74 2030,87 265,35 0,000  
 Error 24 183,68 7,65  
 Total 26 4.245,43

S = 2,766 R-quad. = 95,67% R-quad. (Ajustada) = 95,31%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	-----	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----
1	9	8,099	1,865	(- * -)								
2	9	17,587	1,301	(- * )								
3	9	37,530	4,218	(- * )								
						-----	+	-----	+	-----	+	-----
						10		20		30		40

Desv.Est. agrupada = 2,766

**ANOVA unidireccional: S10z vs. S**

Font GL SC MC FP  
 S 2 3 1 0,01 0,992  
 Error 24 4242 177  
 Total 26 4245

S = 13,30 R-quad. = 0,07% R-quad. (Ajustada) = 0,00%

ICs de 95% individuals per a la mitjana  
 basats en Desv.Est. agrupada

Nivell	N	Mitjana	Desv.Est.	-----	+	-----	+	-----	+	-----	+	-----
bn0	9	20,65	12,78	(----- * -----)								
bn90 /	0	9	21,11	12,85	(----- * -----)							
nb0	9	21,46	14,21	(----- * -----)								
						-----	+	-----	+	-----	+	-----
						15,0		20,0		25,0		30,0

Desv.Est. agrupada = 13,30