

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE UNA BROCA EN ACERO RÁPIDO (HSS)  
MODIFICADA SUPERFICIALMENTE CON IONES DE NITRÓGENO Y TITANIO  
USANDO LA METODOLOGÍA ANOVA**

**OSCAR MAURICIO GÓMEZ VALDERRAMA**

**MIGUEL LEONARDO PATIÑO SILVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE UNA BROCA EN ACERO RÁPIDO (HSS)  
MODIFICADA SUPERFICIALMENTE CON IONES DE NITRÓGENO Y TITANIO  
USANDO LA METODOLOGÍA ANOVA**

**OSCAR MAURICIO GÓMEZ VALDERRAMA**

**MIGUEL LEONARDO PATIÑO SILVA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Mecánicos**

**Director**

**ISNARDO GONZÁLEZ JAIMES**

**Ingeniero Mecánico**

**Codirector**

**ELY DANNIER V-NIÑO**

**M.Sc. en Física**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

A Dios, a mis padres, Mario Gómez García y Margarita Valderrama Tasco, por su constante apoyo y amor a lo largo de mi carrera y de mi vida.

A mis hermanos y mis sobrinos en especial Juan Esteban que ya no se encuentra con nosotros, por su constante motivación, amistad y ayuda desinteresada.

A mi familia en general por su apoyo de una u otra manera.

A todos mis docentes, amigos y compañeros que de una u otra manera aportaron su granito de arena en mi crecimiento personal y profesional.

**OSCAR MAURICIO GÓMEZ VALDERRAMA**

A Dios, a mis padres y familiares por brindarme su apoyo incondicional en cada momento y permitirme cumplir un logro más en mi vida.

A mi hermana y mis dos hermosas sobrinitas por brindarme su cariño e impulsarme diariamente a seguir adelante en mis metas.

A los docentes y amigos quienes contribuyeron en mi formación profesional y personal.

**MIGUEL LEONARDO PATIÑO SILVA**

Oscar Mauricio Gómez Valderrama y Miguel Leonardo Patiño Silva como autores del presente trabajo de grado expresan los más sinceros agradecimientos a las siguientes personas:

Al ingeniero Isnardo González Jaimes, quien con su conocimiento y experiencia nos sirvió de guía no solo en el desarrollo del presente proyecto de grado, sino también a lo largo de nuestra formación profesional.

A Ely Dannier V-Niño, por su apoyo en la fase de implantación de las brocas y en la consecución de los recursos necesarios para desarrollar la presente tesis de grado.

Al "pollo" Edwin Ramírez Mayorga auxiliar del laboratorio de sistemas flexibles, por su colaboración en la fase de pruebas.

A los profesores Fredy y Hernán por su disposición al trabajo y colaboración desinteresada.

A todos los docentes de la escuela de Ingeniería Mecánica, quienes con sus conocimientos nos ayudaron y motivaron a culminar nuestra carrera.

A nuestros padres, hermanos, familiares y amigos por su constante compañía a lo largo de nuestra vida universitaria.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. MARCO TEÓRICO DEL DESGASTE PRESENTE EN LAS BROCAS	22
1.1 DESGASTE EN LOS PROCESOS DE TALADRADO	22
1.2 GEOMETRÍA DE LAS BROCAS HELICOIDALES	26
1.2.1 Características de la geometría.	26
1.3 PARÁMETROS DE CORTE	31
1.3.1 Velocidad de corte	31
1.3.2 Avance	32
1.3.3 Profundidad de corte	33
2. MARCO TEÓRICO DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTOS DE RECUBRIMIENTO SUPERFICIALES	34
2.1 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN LA INDUSTRIA	34
2.1.1 Características de los tratamientos superficiales	35
2.1.2 Tipos de procesos físicos de modificación superficial	35
2.1.3 Requisitos del material a tratar	44
2.1.4 Propiedades del TiN	44
2.1.5 Propiedades del Ti	45
2.1.6 Propiedades del N2	46

3. EQUIPOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL Y LA MEDICIÓN DEL DESGASTE	48
3.1 REACTOR MOSMET	48
3.1.1 Generalidades	48
3.1.2 Componentes	48
3.2 CENTRO DE MECANIZADO CNC	50
3.2.1 Generalidades	50
3.2.2 Especificaciones	51
4. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE EN LAS BROCAS	52
4.1 PRUEBAS PRELIMINARES	52
4.2 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORTE	56
4.3 GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LAS BROCAS	61
4.4 GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE A TALADRAR	62
4.5 PROCESO DE IMPLANTACIÓN DEL Ti Y EL TiN	63
4.5.1 Preparación de las brocas	64
4.5.2 Condiciones de implantación	64
4.5.3 Número de brocas a implantar	65
4.5.4 Proceso de operación del reactor MOSMET	66
4.6 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE	76
5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE DE LAS BROCAS	81

5.1 COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES GRUPOS DE BROCAS PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE USANDO UN EXPERIMENTO UNIFACTORIAL COMPLETAMENTE ALEATORIZADO	81
5.1.1 Numero de huecos perforados por cada broca	82
5.1.2 Desgaste en función de la longitud total taladrada	83
5.1.3 Planteamiento de hipótesis	84
5.1.4 Análisis de varianza (ANOVA).	84
5.1.5 Análisis DUNCAN	90
5.1.6 Discusión de resultados	93
5.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS RECUBRIMIENTOS TI Y TIN EN LAS BROCAS PARA LA MEDICIÓN DE DESGASTE USANDO UN EXPERIMENTO FACTORIAL	95
5.2.1 Número de huecos perforados por cada broca	96
5.2.2 Desgaste en función de la longitud total taladrada	97
5.2.3 Planteamiento de hipótesis	97
5.2.4 Análisis de varianza (ANOVA)	98
5.2.5 Análisis DUNCAN	105
5.3 PRESUPUESTO	107
6. CONCLUSIONES	108
BIBLIOGRAFIA	110
ANEXOS	112

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de taladrado	22
Figura 2. Desgaste del filo de corte de una broca. a) Desgaste de la punta exterior, b) Desgaste del flanco, c) Desgaste del margen	24
Figura 3. Desgaste de cráter y flanco presente en una broca	25
Figura 4. Desgaste abrasivo	26
Figura 5. Longitud de corte de una broca	27
Figura 6. Partes de una broca	27
Figura 7. Formas del filo de corte	29
Figura 8. Broca con canales de refrigeración	30
Figura 9. Partes de una broca	30
Figura 10. Proceso PAPVD	37
Figura 11. Procesos obtenidos de acuerdo a la energía de aceleración de los iones.	39
Figura 12. Esquema del vaporizador de arco eléctrico	43
Figura 13. Reactor MOSMET: (1) Cámara de descargas, (2) Sistema de vacío, (3) Fuente de alto voltaje, (4) Panel de encendido descarga de arco, (5) Fuente para el arco eléctrico, (6) Panel de control general	49
Figura 14. Centro de mecanizado HERMLE U630S	51
Figura 15. Brocas de acero rápido marca KONDOR	52
Figura 16. Acero A36 perforado	53
Figura 17. Broca DORMER	56

Figura 18. Tabla de velocidades de corte IRWIN	57
Figura 19. Tabla Velocidades de Corte DORMER	58
Figura 20. Geometría de las brocas	61
Figura 21. Geometría de material a taladrar	63
Figura 22. a) Porta-muestras sin pulir, b) Porta-muestras pulido	66
Figura 23. Maquina pulidora	66
Figura 24. Limpieza de brocas	67
Figura 25. Ubicación de las brocas dentro de la cámara de descargas	67
Figura 26. a) Reactor apagado, b) Reactor encendido	68
Figura 27. a) Encendido de la bomba mecánica Nz, b) Activación de la válvula V1 para realizar vacío en esta línea, c) Activación de válvula V3 para hacer vacío en la cámara hasta 6 Pa	68
Figura 28. Activación de válvulas para el encendido de la bomba turbomolecular.	69
Figura 29. Encendido de la bomba turbomolecular	69
Figura 30. Entrada en operación de la bomba turbomolecular	70
Figura 31. Apertura de válvula	70
Figura 32. Encendido de la fuente	71
Figura 33. Cierre de la válvula de argón	72
Figura 34. Apertura de válvula	72
Figura 35. Cambio de voltaje de la fuente de alto voltaje	73
Figura 36. Fuente de arco eléctrico	73
Figura 37. Osciloscopio	74
Figura 38. Superficie de las brocas. a) Broca sin tratamiento, b) Broca implantada con TiN a 10KV – 4min, c) Broca implantada con Ti a 10KV –	

4min, d) Broca implantada con TiN a 10KV – 8min, e) Broca implantada con Ti a 10KV – 8min	75
Figura 39. Perforación de anillos de API SPECT 5CT P110	76
Figura 40. Anillo de API SPECT 5CT P110 perforado	77
Figura 41. Panel de control del centro de mecanizado	78
Figura 42. Incremento de potencia	78
Figura 43. Filo de corte brocas implantadas con TiN (10KeV, 4min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado	79
Figura 44. Filo de corte brocas implantadas con Ti (10KeV, 4min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado	79
Figura 45. Filo de corte brocas implantadas con Ti (10KeV, 8 min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado	80
Figura 46. Filo de corte brocas implantadas con TiN (10KeV, 8 min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado	80
Figura 47. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas sin implantación	93
Figura 48. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con TiN y 4 min	93
Figura 49. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con TiN y 8 min	94
Figura 50. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con Ti y 4 min	94
Figura 51. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con Ti y 8 min	95

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades del Nitruro de Titanio	45
Tabla 2. Propiedades del Titanio	46
Tabla 3. Propiedades del N2	47
Tabla 4. Datos técnicos HERMLE U630S	51
Tabla 5. Pruebas realizadas en acero A36	53
Tabla 6. Pruebas en acero API SPECT 5CT P110	54
Tabla 7. Pruebas en API SPECT 5CT P110 bajo nuevos parámetros de corte	55
Tabla 8. Velocidad de corte y avance para diferentes materiales	59
Tabla 9. Tabla de avances DORMER	60
Tabla 10. Parámetros de corte	60
Tabla 11. Geometría de las brocas	61
Tabla 12. Propiedades del acero rápido	62
Tabla 13. Propiedades Acero API SPECT 5CT P110	63
Tabla 14. Condiciones de implantación con nitruro de titanio. a) 10KV – 4 min, b) 10KV - 8 min	64
Tabla 15. Condiciones de implantación con titanio. a) 10KV – 4min, b) 10KeV - 8min	65
Tabla 16. Número total de brocas	65
Tabla 17. Datos de las pruebas realizadas	81
Tabla 18. Número de huecos perforados por cada broca	83

Tabla 19. Distancia taladrada en [m]	83
Tabla 20. Arreglo típico de un experimento factorial	85
Tabla 21. Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos	86
Tabla 22. Datos de las distancias totales taladradas	88
Tabla 23. Cantidades de tratamientos y replicas por tratamiento	89
Tabla 24. Análisis de varianza experimento completamente aleatorio	89
Tabla 25. Selección del $F_T$	90
Tabla 26. Valores de varianza y desviación	91
Tabla 27. Tabla Duncan	92
Tabla 28. Número de huecos perforados por las brocas implantadas	96
Tabla 29. Distancia taladrada en [m]	97
Tabla 30. Arreglo general de un diseño factorial de dos factores	99
Tabla 31. Tabla de análisis de varianza para el diseño factorial de dos factores.	101
Tabla 32. Datos de las distancias totales taladradas por las brocas implantadas.	103
Tabla 33. Cantidad de niveles por factor y replicas por factor	104
Tabla 34. Análisis de varianza experimento factorial	104
Tabla 35. Selección del $F_T$	105
Tabla 36. Valores promedios de las distancias taladradas para el tiempo de exposición	106
Tabla 37. Valores promedios de las distancias taladradas para el tipo de material implantado	106
Tabla 38. Valores para la FC y FT de las interacciones	107

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Tabla ANOVA para $\alpha=0,05$ .	113
ANEXO B. Tabla DUNCAN para $\alpha=0,05$ .	114
ANEXO C. Plano broca DORMER.	115
ANEXO D. Plano anillo de acero P110.	116
ANEXO E. Tablas Análisis Experimento Unifactorial Completamente Aleatorizado utilizando Excel.	117

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE UNA BROCA EN ACERO RÁPIDO (HSS) MODIFICADA SUPERFICIALMENTE CON IONES DE NITRÓGENO Y TITANIO USANDO LA METODOLOGÍA ANOVA\*

**AUTOR:** Oscar Mauricio Gómez Valderrama  
Miguel Leonardo Patiño Silva\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Brocas, Acero rápido, Modificación superficial, Implantación iónica, Taladrado, Desgaste, ANOVA.

### DESCRIPCIÓN:

Se estudia la influencia de la modificación superficial mediante la implantación de iones de titanio (Ti) y nitruro de titanio (TiN) generada por descargas pulsadas de alto voltaje y de arco eléctrico a bajas presiones en el desgaste del filo de brocas de acero rápido. El tratamiento superficial se realiza en el reactor para modificación superficial de metales (MOSMET) a una misma descarga (de 10 KV) y a tiempos de implantación de 4 y 8 minutos.

Se utiliza acero API SPECT 5CT P110 como material de perforación utilizando un centro de mecanizado de control numérico (CNC) bajo parámetros de corte como velocidad de corte y de avance constantes, de manera que se pueda medir la distancia total taladrada por cada broca. Estos datos son analizados estadísticamente utilizando la herramienta ANOVA con el fin de justificar la utilización de la técnica de tratamiento superficial y determinar cuál de los tratamientos es el más adecuado para esta operación de mecanizado.

Una vez realizado el análisis de varianza se obtuvo que las brocas sometidas al tratamiento superficial con iones de TiN a 10 KV y 8 minutos presentaron la mayor distancia taladrada lo cual representa una mejora en la resistencia al desgaste de éstas herramientas. De igual forma los demás tratamientos disminuyeron notablemente el desgaste del filo de las brocas en comparación con las no tratadas superficialmente.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Isnardo González Jaimes (Director). Ely Dannier V-Niño (Codirector).

## ABSTRACT

**TITLE:** WEAR EVALUATION OF A HSS DRILL SUPERFICIALLY MODIFIED WITH NITROGEN AND TITANIUM IONS USING THE ANOVA METHODOLOGY\*

**AUTHOR:** Oscar Mauricio Gómez Valderrama  
Miguel Leonardo Patiño Silva\*\*

**KEYWORDS:** Drill, High-Speed Steel, Surface Modification, Ionic Implantation, Drilling, Wear, ANOVA.

### DESCRIPTION:

The study the influence of surface modification through the ion implantation of titanium (Ti) and Titanium Nitride (TiN) generated by high voltage and arc discharges at low pressures in the HSS drills edge wear. The surface treatment is performed in the Metal Surface Modification (MOSMET) reactor to same discharge (of 10 KV) and implantation times of 4 and 8 minutes.

API SPECT 5CT P110 steel is used as drilling material using a machining center numerical control (CNC) under cutting parameters such as cutting and progress constant speed, so that you can measure the total distance drilled per drill. These data are analyzed statistically using the tool ANOVA in order to justify the use of the technique of surface treatment and determine which treatment is most appropriate for this machining.

Once the analysis of variance was obtained that the drills subjected to the surface treatment with ions of TiN to 10 KV and 8 minutes showed the greatest distance drilled which represents an improvement in wear resistance of these tools. Similarly other treatments decreased significantly edge wear of the drill compared to the untreated surface.

---

\* Degree Project.

\*\* Physical Mechanical Engineerings Faculty. Mechanical Engineering. Director: Isnardo González Jaimes. Codirector: Ely Dannier V-Niño.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la constante demanda por bienes de consumo de todo tipo ha generado una fuerte búsqueda de nuevos materiales y nuevas formas de mejorar los ya existentes, tal es el caso de los materiales empleados para la fabricación de las herramientas de corte. Dicha mejora en estos materiales se ha direccionado hacia la modificación superficial de los mismos apoyándose en los nuevos desarrollos tecnológicos.

Dentro de las operaciones por arranque de viruta el agujereado es una de las más utilizadas actualmente, generando consigo la necesidad de búsqueda de nuevos materiales o en la mayoría de casos el mejoramiento de los ya existentes mediante tratamientos que modifiquen sus propiedades frente al desgaste en forma superficial. Con el objeto de contribuir al mejoramiento de los procesos de recubrimiento, la obtención y caracterización de las propiedades aportadas por el mismo, ha generado una tendencia investigadora que busca mejorar los procesos de implantación, las metodologías de trabajo y por supuesto fomentar una fuerte base científica que permita incursionar en el mercado industrial garantizando no solo la mejora en cuanto a resistencia al desgaste y dureza sino también una mejora en propiedades secundarias como las eléctricas, magnéticas y corrosivas.

El presente trabajo de investigación busca contribuir al desarrollo de los recubrimientos superficiales como alternativa al mejoramiento de las propiedades de los materiales de las herramientas de corte, validando o desechando la hipótesis de que al aplicar un recubrimiento de Ti y TiN y realizar pruebas repetitivas sobre un acero P110 se aumenta la vida útil de la broca y con ello observar cuál de las condiciones de implantación (tiempo de exposición de la muestra o energía aplicada durante el proceso de implantación) contribuye al mejoramiento de la resistencia al desgaste.

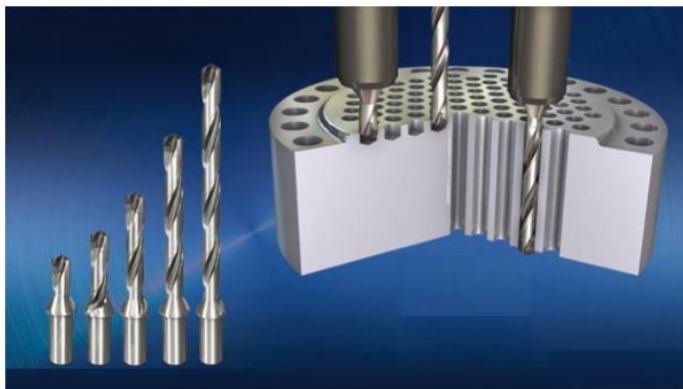
## 1. MARCO TEÓRICO DEL DESGASTE PRESENTE EN LAS BROCAS

A continuación se describen los tipos de desgaste presentes en las brocas.

### 1.1 DESGASTE EN LOS PROCESOS DE TALADRADO

El taladrado es una operación de fabricación altamente empleada en los procesos de mecanizado por arranque de viruta, debido a la cotidiana y constante generación de diseños mecánicos en los que se hace necesaria la aparición de superficies perforadas. Es por esto que se hace necesario desarrollar proyectos de investigación que contribuyan a prolongar la vida útil de la herramienta y con ello permitir que la productividad en los procesos de manufactura sea mayor.

Figura 1. Proceso de taladrado.



Fuente: <http://www.izaro.com/contenidos/ver.php?id=es&se=5&su=52&co=1311179576>.

El desgaste de la herramienta de corte en los procesos de taladrado, puede ser de filo, de cráter o por difusión entre otros; estos se generan debido al trabajo de alto impacto ocasionado al perforar algún tipo de material, produciendo con ello vibraciones que afectan el acabado final, cambios en el perfil de corte y por ende una disminución de la eficiencia de la herramienta. Existen diversos tipos de

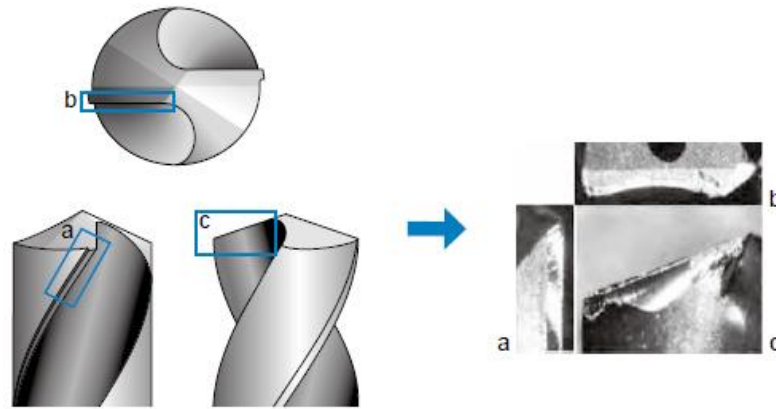
desgaste y estos variarán en función del trabajo a realizar, la temperatura de operación y por supuesto de si la broca presenta o no algún tipo de recubrimiento superficial. Dicho desgaste es un evento progresivo que se hace visible en los puntos de mayor diámetro de la broca, es decir en el filo de corte debido a que esta región de la herramienta es la que entra inicialmente en contacto con el material a maquinar<sup>1</sup>.

Las condiciones o parámetros de corte son parte importante del proceso de mecanizado que influyen de manera directa sobre el desgaste de la broca. Así sean las adecuadas no pueden hacer mayor cosa frente al constante deterioro del filo de corte debido a las discontinuidades de los materiales tanto de la pieza como de la broca, al tipo de máquina herramienta con la que se cuente y por supuesto a la calidad del recubrimiento que tenga la broca, es por ello que la determinación de la vida útil de una broca es un proceso lleno de variables cuya influencia debe ser determinada.

**1.1.1 Características del desgaste en las brocas.** A continuación se presenta una descripción general de los tipos de desgaste más comunes e importantes presentes en las brocas con el fin de observar la relevancia e importancia de una investigación en este campo.

**1.1.1.1 Desgaste de flanco.** El desgaste de flanco es quizás el tipo más común de desgaste de la herramienta, y ocurre cuando la broca que entra en contacto con la superficial que es perforada se comienza a agotar, este tipo de desgaste puede ser generado por una elevada velocidad de corte, poca resistencia del material de la broca y avances muy bajos ocasionando un deficiente acabado superficial o a la pérdida de las tolerancias dimensionales.

Figura 2. Desgaste del filo de corte de una broca. a) Desgaste de la punta exterior, b) Desgaste del flanco, c) Desgaste del margen.



Daño del filo de corte

Fuente: Catálogo Datos Técnicos Mitsubishi Materials.

**1.1.1.2 Desgaste de cráter.** El desgaste de cráter se presenta en la superficie de ataque de la herramienta y ya que cambia la geometría de la intercara entre viruta y herramienta puede dar lugar a una mala formación de viruta, cambiando las direcciones de las fuerzas de corte y debilitando el filo de la broca afectando al proceso de corte. Los factores más importantes que influyen sobre el desgaste de cráter son: la temperatura de la intercara herramienta – viruta y la afinidad química entre los materiales de herramienta y pieza. Además, los factores que influyen sobre el desgaste de flanco también influyen sobre el desgaste de cráter. Por tal motivo si se quiere disminuir la contribución a esta forma de desgaste se debe contar con una broca que presente una elevada dureza tanto en frío como en caliente y garantizar que exista una mínima afinidad entre los materiales de la pieza y la herramienta de corte, o también se puede reducir primero la velocidad de corte para así conseguir una temperatura inferior y a continuación reducir el

avance, teniendo presente que esto afectara la productividad cuando se llevan a cabo procesos repetitivos de taladrado<sup>1</sup>.

Figura 3. Desgaste de cráter y flanco presente en una broca.



Fuente: PATIÑO RODRIGUEZ, Carmen Elena. Análisis de Confiabilidad para Herramientas de Corte Aplicado al Proceso de Taladrado. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 2006. No. 036.

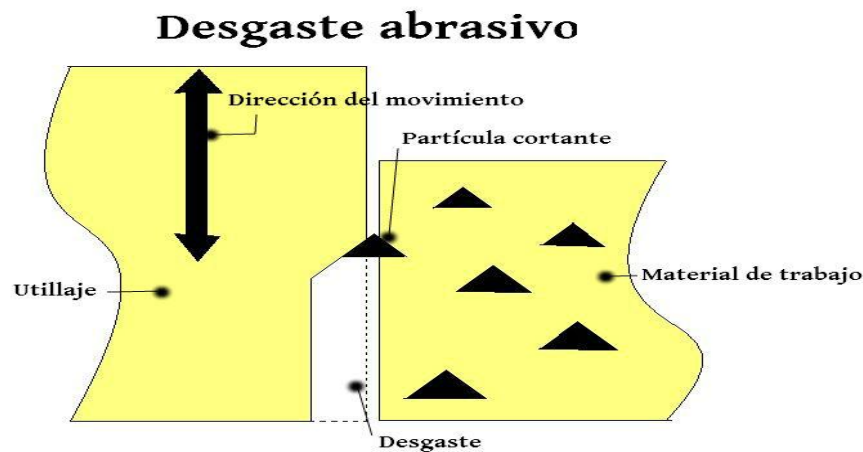
**1.1.1.3 Desgaste por difusión.** Se presenta entre temperaturas de 900 y 1200 °C, por lo que no presentan importancia para las herramientas de aceros al carbono y las de acero rápido, las cuales no pueden trabajar a estas temperaturas. En cambio en las de metal duro, cerámicas o nitruro de boro, se eleva la movilidad atómica y se produce una disolución mutua del material de la pieza y el de la herramienta. La actividad de este proceso aumenta con la velocidad de corte. De ahí que el desgaste difusivo pueda considerarse como un desgaste químico que produce variaciones en la capa superficial de la herramienta y de esa forma compromete la resistencia a desgaste de la misma.

---

<sup>1</sup> SANDVIK. Taladrado tipo de desgaste. [En línea]. [Citado en 9 de marzo de 2013]. Disponible en internet: <http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/drilling/wear-and-troubleshooting/wear-types/pages/default.aspx>

**1.1.1.4 Desgaste por abrasión.** El fenómeno de abrasión produce desgaste debido a que las partículas más duras incluidas en el material a mecanizar o en el filo de la broca generan ralladuras sobre la herramienta que podrían no ser paralelas a la dirección de salida de la viruta ocasionando un fuerte desgaste en la herramienta de corte.

Figura 4. Desgaste abrasivo.



Fuente: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Desgaste\\_abrasivo.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Desgaste_abrasivo.jpg).

## 1.2 GEOMETRÍA DE LAS BROCAS HELICOIDALES

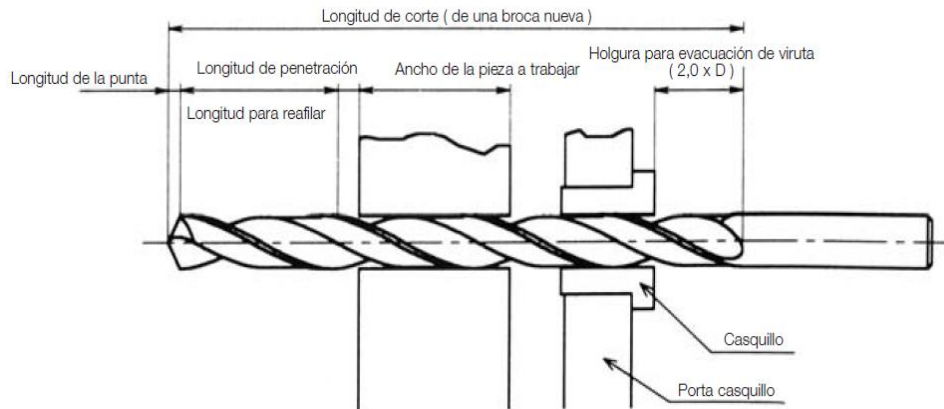
A continuación se presentan las principales características de las brocas helicoidales.

**1.2.1 Características de la geometría.** A continuación se presenta la información relacionada con las dimensiones de una broca helicoidal con el fin de familiarizarse con su diseño.

**1.2.1.1 Longitud de corte.** El largo o longitud de corte (ver Figura 5) es uno de los determinantes más críticos de la vida de la herramienta, para una mayor duración de la herramienta, el largo de corte debería ser lo más corto posible. Un largo de

corte mayor da lugar a una menor rigidez de la broca debido entre otras cosas al pandeo que se produce en este tipo de brocas, lo cual causa un taladrado inestable.

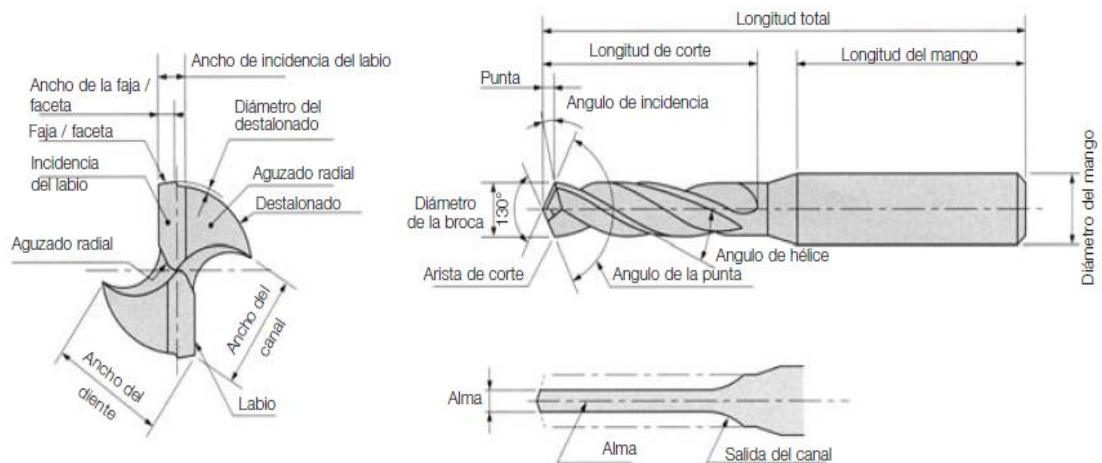
Figura 5. Longitud de corte de una broca.



Fuente: Catálogo DORMER.

En la Figura 6 se muestra la geometría detallada de una broca indicando sus principales ángulos y longitudes.

Figura 6. Partes de una broca.



Fuente: Catálogo DORMER.

A continuación se nombran los ángulos más relevantes en una broca.

**Ángulo de la punta:** ángulo que se forma por los filos de corte de la broca. En general, éste es de  $118^{\circ}$ ; pero se debe ajustar de acuerdo con la aplicación. El ángulo de la punta realiza la misma función que el ángulo de posición para todas las demás herramientas de corte.

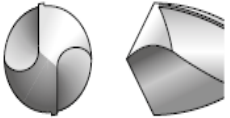
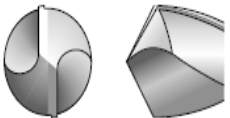
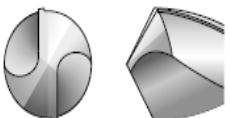
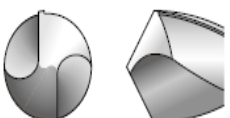

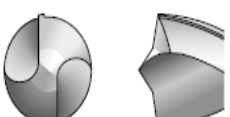
**Ángulo de posición:** ángulo de acercamiento del filo de corte conforme penetra en la pieza de trabajo. El ángulo de posición controla la dirección de las fuerzas de corte radial y axial.

**Ángulo de hélice:** ángulo formado por el borde de un canal en espiral y una línea paralela a la línea central de la broca.

**Ángulo de desprendimiento:** varía de acuerdo con la posición del filo de corte, y disminuye en cuanto la circunferencia se aproxima al centro.

**1.2.1.2 Geometría del filo de corte.** Según la aplicación se puede seleccionar una broca con la geometría del filo de corte más adecuada permitiendo así un mecanizado eficaz y por lo tanto un agujero con dimensiones más precisas como se puede ver a continuación.

Figura 7. Formas del filo de corte.

Nombre del afilado	Figura	Características y efecto	Aplicación
Cónica		<ul style="list-style-type: none"> <li>• El flanco es cónico y el ángulo de desprendimiento, aumenta hacia el centro de la broca.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso general</li> </ul>
Plana		<ul style="list-style-type: none"> <li>• El flanco es liso.</li> <li>• Afilado rápido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principalmente para taladros de diámetro pequeño</li> </ul>
Tres ángulos de graduación		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al no haber filo de corte, los resultados de la fuerza centrípeta es muy elevada y el agujero es más grande de lo normal</li> <li>• Requiere una afiladora especial.</li> <li>• Afilado superficial de tres lados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para operaciones de taladrado que requieren alta precisión del agujero y precisión de posicionamiento.</li> </ul>
Punto de la hélice		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para aumentar el ángulo de ataque cerca del centro de la broca, se recomienda un afilado cónico combinado con una hélice irregular.</li> <li>• Borde de corte tipo S con gran fuerza centrípeta y precisión de mecanizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para taladrado que requiere alta precisión.</li> </ul>
Labio radial		<ul style="list-style-type: none"> <li>• El borde de corte está afilado centrípetamente para dispersar la carga.</li> <li>• Gran precisión de mecanizado y rugosidad de superficie acabada.</li> <li>• Para agujeros pasantes, rebabas pequeñas en la base.</li> <li>• Requiere una afiladora especial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fundición,</li> <li>• Aleaciones de aluminio</li> <li>• Para placas de fundición.</li> <li>• Acero</li> </ul>
Taladro de punto central		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta geometría tiene ángulo de punto de dos etapas para mejor concentricidad y una reducción del choque al sacar la pieza de trabajo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para taladrado de chapa delgada.</li> </ul>

Fuente: Catálogo Datos Técnicos Mitsubishi Materials.

**1.2.1.3 Descripción y partes de la herramienta de corte.** Las brocas constan de tres partes principales, las cuales son:

**El vástago:** Es la parte que se coloca en el husillo de la máquina herramienta y se hace girar a unas determinadas rpm dependiendo de las condiciones de trabajo. Estos pueden ser rectos o cónicos.

**Cuerpo:** Es la parte cilíndrica que va desde el vástago hasta la punta. Este en su recorrido tiene unas flautas o hélices cuya función es la de dejar entrar el fluido refrigerante y dejar escapar la viruta. Cabe resaltar que si se desea una mayor refrigeración de la broca se debería contar con una herramienta hueca y con una máquina herramienta que permita enviar el fluido refrigerante a través de ella como se observa a continuación.

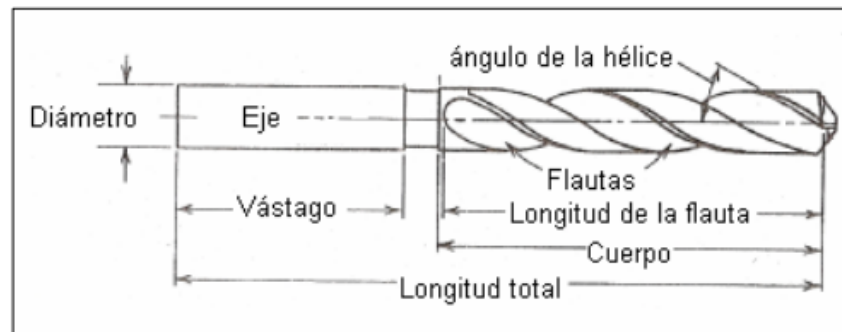
Figura 8. Broca con canales de refrigeración.



Fuente: [http://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/whatsnew/2010/mms\\_drill.html](http://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/whatsnew/2010/mms_drill.html).

**Punta:** Se encuentra en todo el extremo cortante o filo cónico de la broca. La forma y condiciones de la punta son muy importantes para la acción cortante de la broca de ahí sus diferentes presentaciones.

Figura 9. Partes de una broca.



Fuente: [www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/5128\\_taladro.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/5128_taladro.pdf).

### 1.3 PARÁMETROS DE CORTE

Los principales parámetros de corte que intervienen en el proceso de taladrado se describen a continuación.

**1.3.1 Velocidad de corte.** La velocidad de corte es uno de los parámetros fundamentales en cualquier proceso de mecanizado, tanto así que de su adecuada selección depende una duración prolongada de la vida de la herramienta de corte y por supuesto un acabado superficial óptimo, dando como resultado una alta productividad en cualquier proceso de taladrado.

Una velocidad de corte demasiado alta puede dar lugar al desgaste muy rápido del filo de la herramienta, deformación plástica del filo de corte con pérdida de tolerancia del mecanizado y una calidad del mecanizado deficiente. Por otra parte una velocidad muy baja puede ser la causante de una evacuación negativa de la viruta, baja productividad y costos elevados del mecanizado.

La velocidad de corte esta expresada generalmente en [m/min] y se caracteriza por ser tangencial al movimiento de rotación de la broca. Varía desde cero en el centro o punta de la herramienta de corte, hasta un valor máximo en la periferia del filo. Esta velocidad depende específicamente del tipo de material del que está constituida la broca y por supuesto del material a trabajar. Dichas velocidades se encuentran en diferentes tablas proporcionadas por los fabricantes que han obtenido dichos valores de la experiencia lograda durante muchos años de estudios. Una vez determinada la velocidad  $v$  de corte en [m/min], se determina la velocidad angular  $\omega$  (radianes/s) o  $n$  (rpm), que la máquina herramienta debe suministrar a la herramienta de diámetro  $d$  en milímetros para efectuar el corte, este cálculo se hace reemplazando los valores de  $v$  y  $d$  en la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\pi dn}{1000} \qquad \text{Ecuación 1}$$

**1.3.2 Avance.** El avance es la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta, es decir, la velocidad con la que progresa el corte. El avance de la herramienta de corte es un factor muy importante en el proceso de taladrado.

Las brocas pueden cortar adecuadamente en un rango de velocidades de avance por cada revolución de la herramienta, denominado *avance por revolución* ( $f_{rev}$ ). Este rango depende fundamentalmente del diámetro de la broca, de la profundidad del agujero, además del tipo de material de la pieza y de la calidad de la broca. Este rango de velocidades se determina experimentalmente y se encuentra en los catálogos ofrecidos por los fabricantes de brocas.

La velocidad de avance en [mm/min], es el producto del avance por revolución por la velocidad de rotación de la herramienta.

$$V_f = f * n \quad \text{Ecuación 2}$$

Hoy en día con el progreso de los equipos de control numérico se puede trabajar con cualquier velocidad de avance en la máquina herramienta, con ello se logró vencer la dificultad que presentaban las máquinas de antaño que obligan al operario a seleccionar el avance de una gama de velocidades con las que contaba la máquina haciendo que los parámetros recomendados por los fabricantes se tuvieran que aproximar a las condiciones de la máquina.

Desde el punto de vista de la selección de la velocidad de avance se sabe que un valor excesivo puede ocasionar una elevada rugosidad superficial del mecanizado y un aumento en el riesgo de rotura de la broca, aunque disminuiría el tiempo de corte y el desgaste de la herramienta. Por otro lado una velocidad de avance baja sería causante de una viruta más larga, un desgaste acelerado de la herramienta, una mayor duración del tiempo de mecanizado y por ende generaría un mayor costo en el proceso de fabricación, aunque se ganaría una mayor calidad superficial en el mecanizado.

**1.3.3 Profundidad de corte.** La profundidad de corte o profundidad de pasada es la distancia radial de penetración de la herramienta en la pieza, generalmente se denota como  $a_p$ . Sus valores dependen de la longitud del filo de la herramienta y la cantidad de material a remover.

## **2. MARCO TEÓRICO DE LOS PROCESOS DE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL**

En este capítulo se muestra la importancia de utilizar las técnicas alternativas de modificación superficial de materiales para mejorar sus propiedades físicas.

### **2.1 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN LA INDUSTRIA**

En la actualidad, los avances tecnológicos en el área de los materiales van dirigidos a la búsqueda de nuevas técnicas de tratamiento para el mejoramiento de las propiedades superficiales de los mismos<sup>2</sup>.

Una de éstas técnicas es la Implantación Iónica Tridimensional, la cual permite mejorar propiedades como la resistencia al desgaste y a la corrosión de materiales utilizados en los diferentes sectores de la industria.

En este proceso de implantación de iones acelerados tiene lugar la modificación de capas superficiales y sub-superficiales del material original sin cambio en las dimensiones geométricas de la pieza tratada. En este sentido el método presenta ciertas ventajas respecto a los procesos tradicionales de saturación de superficies de materiales sólidos tales como nitruración, carbonización, cementación con boro, entre otros<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> E. D. Valbuena Niño. et. al. CARACTERIZACIÓN DEL ACERO AISI 4140 IMPLANTADO POR IONES DE NITRÓGENO. Revista Colombiana de Física. 2010. Vol. 42. No. 3. Pág. 387.

<sup>3</sup> E. D. Valbuena Niño. et. al. CARACTERIZACIÓN DE CUPONES GAVIMETRICOS DE ACERO API 5LX 65 IMPLANTADO POR IONES DE NITROGENO E IONES DE TITANIO. Revista Colombiana de Física. 2011. Vol. 43. No. 1. Pág. 135.

**2.1.1 Características de los tratamientos superficiales.** La forma como se produce la ionización del material reactivo, las condiciones de vacío y temperatura a la cual se realiza la implantación son parámetros importantes de este proceso. A continuación se describe cada uno de éstos.

**2.1.1.1 Obtención del metal reactivo.** Se realiza evaporando una cantidad de metal en un entorno de vacío con la ayuda de un arco eléctrico. El metal evaporado ionizado, una vez generado se proyecta sobre las piezas a recubrir por acción de una diferencia de potencial entre éstas y el cátodo y reacciona con los gases reactivos introducidos dentro de la cámara (Nitrógeno, Oxígeno, Metano, Acetileno, etc.).

**2.1.1.2 Temperatura y presión.** Los procesos PVD requieren usar cámaras de alto vacío (hasta 10 – 5 mbar), llegando durante el proceso a presiones de 10 – 3 mbar, en cuanto a temperatura depende de la aplicación del recubrimiento, ya sean cerámicos de alta dureza (480°C – 550°C), fines decorativos (50°C – 60°C) o de baja fricción (temperaturas inferiores a 480°C)<sup>4</sup>.

**2.1.2 Tipos de procesos físicos de modificación superficial.** Las principales técnicas físicas de modificación superficial utilizadas en la industria para mejorar las propiedades físicas de los materiales se describen a continuación.

---

<sup>4</sup> MENA GALVIS, Ronald L., VILAMIZAR SIERRA, Sergio G. DISEÑO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE PIEZAS METALICAS DE MECANIZACION CON Y SIN RECUBRIMIENTO DE TiN MEDIANTE UN PROCESO PVD, SOMETIDAS AL DESGASTE. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012. Pág. 25.

**2.1.2.1 Deposición física en fase vapor (PVD).** Es un proceso de recubrimiento termo físico en el que los materiales de revestimiento se vaporizan en una cámara de vacío que contiene gas reactivo y se depositan en la pieza a tratar. Existen varios métodos de PVD entre los que se incluyen la evaporación en arco y la dispersión por magnetrón, con los que se depositan una variedad de elementos o compuestos.

En el proceso de PVD en arco el material de recubrimiento se vaporiza en un entorno de vacío con la ayuda de un arco eléctrico. El material vaporizado pasa a estado de plasma mediante una descarga luminiscente. Las capas creadas mediante este proceso, en el intervalo de temperaturas entre 200 y 550°C, confieren buenas propiedades tribológicas a una amplia gama de materiales. Pueden producirse recubrimiento de una o de varias capas, así como capas de varios elementos y sistemas de recubrimiento con buena adhesión. En el proceso magnetrón PVD el material de revestimiento se dispersa desde un anticátodo utilizando partículas de alta energía. Los compuestos se pueden depositar en una pieza a tratar mediante la adición de un gas reactivo como el Nitrógeno o el Oxígeno. Las capas que se crean a temperaturas de hasta 150°C pueden utilizarse para una amplia gama de materiales, incluidos los plásticos<sup>5</sup>.

**2.1.2.2 Deposición física en fase vapor asistida por plasma (PAPVD).** Consiste en evaporar una cantidad de metal proporcional a la intensidad de la corriente del arco.

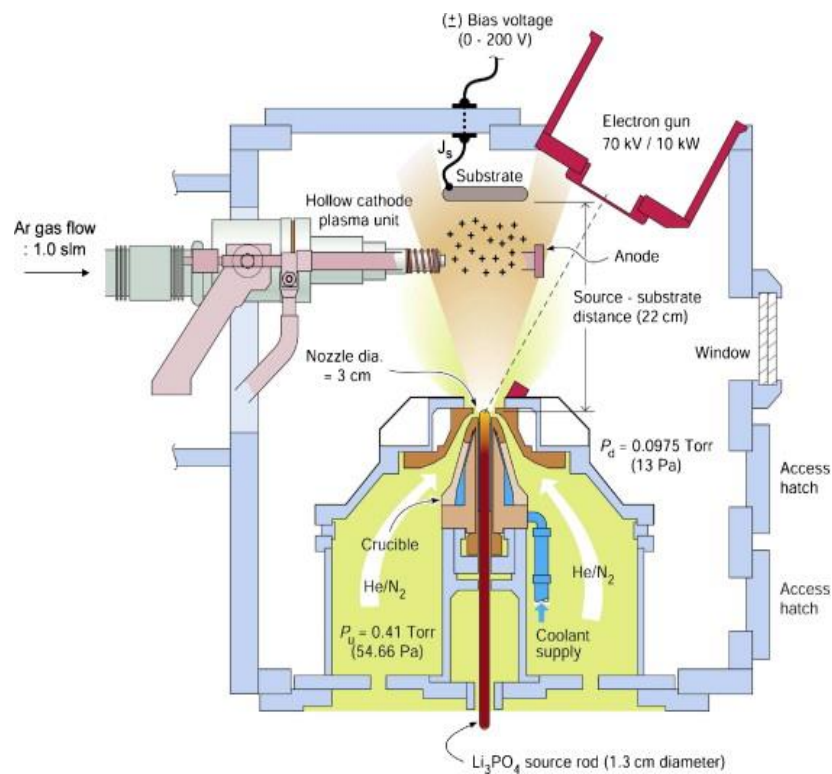
Los procesos de PAPVD pueden ser usados para depositar películas de elementos y aleaciones así como compuestos usando procesos de deposición reactivos.

---

<sup>5</sup>RECUBRIMIENTOS METALICOS MEDIANTE PVD. TRATERIBER. Disponible en: <http://www.trateriber.es/pdf/PVD.pdf>.

En procesos de deposición reactivos, los compuestos son formados por la reacción del material que se deposita con el gas o gases de llenado del reactor (ejemplo CH<sub>4</sub>/Ar para producir carburos).

Figura 10. Proceso PAPVD.



Fuente: Experimental Physical Vapor Deposition Facilities. Intelligent Processing of Materials Laboratory. Disponible en: [http://www.ipm.virginia.edu/research/PVD/Exp/pvd\\_exp\\_fac.htm](http://www.ipm.virginia.edu/research/PVD/Exp/pvd_exp_fac.htm).

En general, los distintos procesos PAPVD son extraordinariamente sensibles al grado de limpieza de las superficies y a los distintos parámetros del proceso, tales como temperatura, presiones parciales del gas residual, grado de ionización del material evaporado<sup>6</sup>.

Las técnicas de PAPVD han significado un aumento en la eficiencia en las técnicas tradicionales para recubrimientos, aventajando a muchas otras en áreas como recubrimientos duros y aún más en piezas de gran tamaño. Industrialmente los equipos de PAPVD son usados para obtener diferentes tipos de recubrimientos, para diferentes aplicaciones que incluyen grandes campos como son la metalurgia, microelectrónica y óptica.

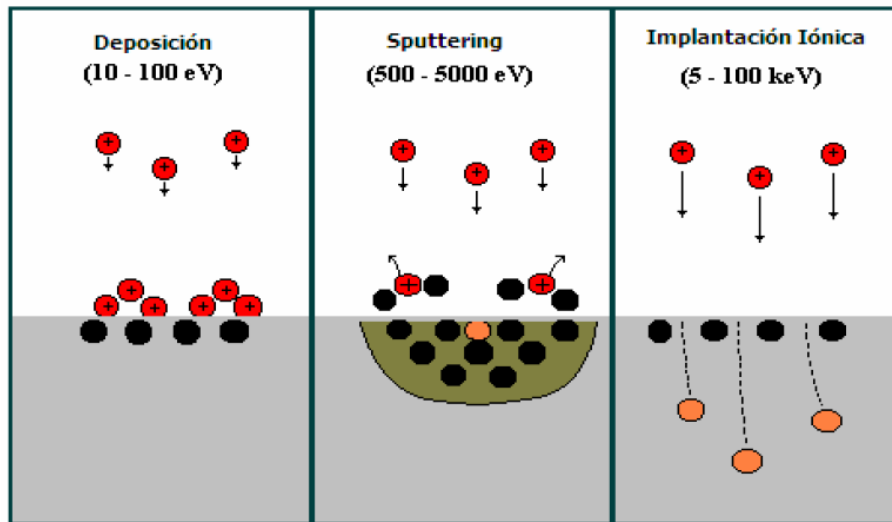
**2.1.2.3 Bombardeo iónico.** Dependiendo de la energía con la que los átomos llegan a una superficie se pueden dar tres procesos diferentes: si la energía es muy baja (hasta decenas de electronvoltios) los iones se depositan en la superficie, formándose un recubrimiento (película delgada), si la energía es mayor (centenas de electronvoltios) predomina un proceso de pulverización de la superficie conocido como Sputtering (desprendimiento de los átomos de una superficie por efecto de colisión de iones con los átomos del blanco). Puede ser útil para limpieza superficial o para evaporar materiales en procesos de recubrimiento. Finalmente a energías mayores a 5 keV hasta algunos MeV, los iones penetran dentro de la superficie sólida incrustándose a una profundidad de muchas capas atómicas<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> HOYOS, Norma y RODRIGUEZ, Rodolfo. EFECTO DEL VOLTAJE DE POLARIZACION EN EL SUSTRATO DE ACERO AISI M2 SOBRE ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LA MONOCAPA TIN DEPOSITADA POR LA TECNICA PAPVD. Redalyc. 2004. Vol. 10. No. 26. Pág. 161.

<sup>7</sup> VALBUENA NIÑO, Ely Dannier. COMPORTAMIENTO DEL ACERO SAE 4140 IMPLANTADO CON IONES DE NITROGENO EN AMBIENTES HIDROGENADOS. Trabajo de Grado Físico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Física. 2004. Pág. 28.

Figura 11. Procesos obtenidos de acuerdo a la energía de aceleración de los iones.



Fuente: VALBUENA NIÑO, Ely Dannier. COMPORTAMIENTO DEL ACERO SAE 4140 IMPLANTADO CON IONES DE NITRÓGENO EN AMBIENTES HIDROGENADOS. Trabajo de Grado Físico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Física. 2004. Pág. 28.

**2.1.2.4 Implantación Iónica.** La implantación iónica consiste en la aceleración de iones contra la superficie del sólido. Gracias a la energía cinética del ion este penetra en la red cristalina generando una serie de procesos ligados, entre los cuales los principales son los siguientes:

- Dispersión superficial y volumétrica de iones incidentes.
- Emisión desde el medio condensado de partículas cargadas y neutras y sus complejos (emisión ion-ion, emisión ion-electrón, chisporroteo, adsorción estimulada por iones de los átomos de la superficie del sólido).
- Emisión de radiación electromagnética con un rango amplio de frecuencias.

- Creación de defectos (vacancias, intersticios, dislocaciones) tanto en la superficie como en el volumen del sólido.

La implantación iónica en las superficies normalmente produce deformaciones de estructura y cambios en la composición que son el origen de su aumento de resistencia al desgaste fricción y corrosión. Los iones implantados se distribuyen en una profundidad que oscila entre 200 y 2000 capas atómicas (aproximadamente 0,05 y 0,5 micras) dependiendo del tipo de ion, del material base y de la energía del bombardeo<sup>8</sup>.

**2.1.2.5 Implantación Iónica Tridimensional (3DII).** El método 3DII (Three Dimensional Ion Implantation), se plantea como una alternativa a las técnicas físicas empleadas para la modificación de superficies en sólidos, la cual consiste en el tratamiento simultáneo de la superficie por flujos producidos mediante la descarga de arco eléctrico y la descarga de alto voltaje a bajas presiones.

Este proceso híbrido (implantación iónica y deposición de metales) es usado para el tratamiento superficial avanzado, el cual consiste en modificar (sin cambio en las dimensiones geométricas) las propiedades físicas ocurridas en las capas superficiales y sub-superficiales de los materiales<sup>9</sup>.

❖ **Descargas pulsadas de alto voltaje a bajas presiones.** Se emplea en la implantación de especies no metálicas. Las propiedades específicas de este tipo de descarga son las siguientes:

---

<sup>8</sup> VALBUENA NIÑO, Ely Dannier. COMPORTAMIENTO DEL ACERO SAE 4140 IMPLANTADO CON IONES DE NITROGENO EN AMBIENTES HIDROGENADOS. Trabajo de Grado Físico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Física. 2004. Pág. 28.

<sup>9</sup> E. D. Valbuena Niño. et. al. APLICACIÓN DE DESCARGAS SIMULTÁNEAS DE ALTO VOLTAJE Y ARCO ELÉCTRICO PARA EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL AVANZADO DE METALES. Revista ITECKNE. 2012. Vol. 9. No. 1. Pág. 15.

- La descarga se enciende y se mantiene bajo la diferencia de potencial entre los electrodos en un rango que va desde 10 hasta 100 KeV aproximadamente.
- La descarga es auto-sostenida, es decir, no necesita de un plasma de soporte.
- El voltaje de mantenimiento de la descarga coincide con el voltaje de encendido.

El plasma generado en este tipo de descarga se comporta como una fuente de iones que adquiere una alta energía, proporcional al potencial suministrado en la zona de caída catódica hacia la superficie de la muestra. De esta forma se obtiene una implantación perpendicular a la superficie, con un flujo de iones cuasimonoenergéticos. Esto resulta ser muy importante si se tiene en cuenta que la máxima dosis retenida por una muestra implantada está determinada por el ángulo de incidencia de los iones<sup>10</sup>. Además el rango de bajas presiones (menos de 4 Pa) disminuye significativamente la posibilidad de contaminación de las muestras.

La forma del pulso de voltaje y de la corriente en la dependencia del tiempo son criterios de estabilidad de la descarga, y consecuentemente caracterizan parámetros importantes en la implantación de iones tales como: el grado de monoenergicidad y el ángulo de incidencia de los iones sobre la superficie tratada. El carácter monoenergético de los iones que inciden sobre el cátodo es útil en el desarrollo de técnicas efectivas de implantación con ventajas significativas con respecto a las existentes (alta dosis homogénea).

---

<sup>10</sup> J. R. Conrad Material Sci. Engin. 116<sup>a</sup>, 197 (1987).

Al utilizar las tecnologías de la implantación iónica, los límites de las concentraciones de las sustancias que se van a insertar dentro del volumen de las muestras se determinan por la interacción cinética de iones de alta energía con la red cristalina y no a partir de las constantes de difusión de los procesos equilibrados de saturación de la superficie como se hace en los métodos tradicionales plasmotérmicos para el tratamiento superficial de materiales<sup>11</sup>.

❖ **Descargas de arco eléctrico a bajas presiones.** Este tipo de descarga se utiliza para la implantación de especies metálicas. A continuación se presentan algunas características del evaporador de arco eléctrico:

- La descarga de arco no se enciende por toda la superficie catódica sino está localizada solo en uno o varios puntos que se llaman manchas brillantes (spots).
- Esta propiedad de evaporadores de arco exige que la mancha se mueva y evapore el material catódico de manera controlada. Por esta razón el evaporador fue equipado con un sistema de magnetos permanentes y alternos (solenoides) que forzarán la mancha de arco escanearse simultáneamente en las direcciones radial y acimutal que garantiza un desgaste uniforme del material del cátodo.
- A pesar de que el vaporizador sea suministrado por un generador d.c. de 20-25 V bajo una corriente de 100-300 A la descarga de arco se genera a cuenta de la aparición y siguiente destrucción térmica de centros de emisión de los electrones y vapores del material catódico.

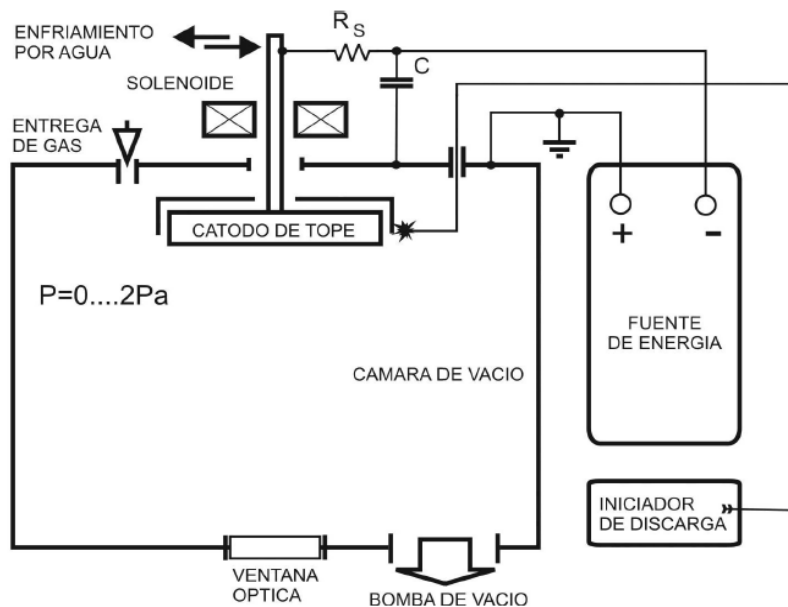
---

<sup>11</sup> J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, "The Stopping and Range of ions in solids", Pergamon Press, Inc. New York, (1985).

- El tiempo de vida característico de estos centros es 0.01-0.02  $\mu\text{s}$  y sus dimensiones varían entre 0.01 y 1.0  $\mu\text{m}$ .

En la Figura 12 se muestra el esquema eléctrico del vaporizador de arco conectado en el dispositivo JUPITER.

Figura 12. Esquema del vaporizador de arco eléctrico.



Fuente: E. D. Valbuena Niño. et. al. ESTUDIO DE CARACTERÍSTICAS VOLTIO-AMPÉRICAS Y PECULIARIDADES DE FUNCIONAMIENTO DE UN VAPORIZADOR DE ARCO EN VACÍO. Revista Colombiana de Física. 2011. Vol. 43. No. 2. Pág. 459.

El evaporador de arco está ubicado en el centro del techo de la cámara JUPITER. La cámara se bombea por una bomba turbomolecular de una productividad de 1500 l/s hasta una presión (residual) de 0.1 mPa. El cátodo está conectado con un generador de voltaje mediante una resistencia de corriente fuerte de 10 m que sirve para la medición de la corriente de descarga.

Cerca de esta resistencia se localiza un condensador eléctrico que bloquea la influencia de la inductividad del cable de corriente. El generador con una característica voltio-ampérica descendente garantiza el funcionamiento estable del evaporador en el rango de corrientes 100-300 A bajo el voltaje 20-30 V. La descarga se inicia con ayuda de un encendedor tipo plasma-erosión. Las muestras a tratar se colocan en una portamuestra colocado sobre el piso de la cámara de descarga<sup>12</sup>.

**2.1.3 Requisitos del material a tratar.** La superficie de las piezas que van a ser sometidas a recubrimientos deben prepararse previamente eliminando cualquier clase de impureza que se encuentre en ésta, de manera que se garantice que los iones del material a implantar penetren en la superficie del sustrato.

**2.1.4 Propiedades del TiN.** El Nitruro de Titanio es un compuesto utilizado frecuentemente en los tratamientos superficiales de herramientas debido a que permite una mejora de sus propiedades como el incremento de la dureza, disminución del coeficiente de fricción, aumento de la resistencia al desgaste, a la fatiga y a la corrosión, logrando un incremento en la vida útil de éstas<sup>13</sup>. En la Tabla 1 se muestran las propiedades del TiN.

---

<sup>12</sup> E. D. Valbuena Niño, et. al. ESTUDIO DE CARACTERÍSTICAS VOLTIO-AMPÉRICAS Y PECULIARIDADES DE FUNCIONAMIENTO DE UN VAPORIZADOR DE ARCO EN VACÍO. Revista Colombiana de Física. 2011. Vol. 43. No. 2. Pág. 459.

<sup>13</sup> CAICEDO, Julio Cesar. PRODUCCION Y CARACTERIZACION DE SUPERREDES DE NITRURO DE TITANIO – NITRURO DE ZIRCONIO COMO RECUBRIMIENTOS DUROS SOBRE ACERO PARA SUSTITUCION DE UN PRODUCTO IMPORTADO EN EL CORTE DE PAPEL. Trabajo de Grado Ingeniero de Materiales. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías. Programa Académico de Ingeniería de Materiales. 2006. 69p.

Tabla 1. Propiedades del Nitruro de Titanio.

Símbolo Químico	TiN
Espesor	0,25 a 12 $\mu\text{m}$
Dureza	85 HRC
Coefficiente de Fricción	0,05 a 0,6
Resistencia a la Temperatura	En aire comienza a oxidar a 600°C
Temperatura de Fusión	2950°C
Temperatura de Deposición	200°C a 450°C
Resistividad Eléctrica	25 $\mu\text{m-cm}$
Resistencia Química	Inerte a ácidos, bases y disolventes.
Coefficiente de Expansión Térmica	$9,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Conductividad Térmica	0,046 Cal/s-cm-°C
Densidad	5,22 g/cm <sup>3</sup>
Estructura Cristalina	Cúbica centrada en las caras
Módulo de Elasticidad	600 Gpa
Calor de Formación	80750 Cal/mol
Coefficiente de Poisson	0,25

Fuente: Autores.

**2.1.5 Propiedades del Ti.** Entre sus características químicas se destaca su dimorfismo, pues a temperatura ambiente posee una estructura de hexágono compacto, conocido como fase alfa, pero más allá de 882°C, adopta una estructura física centrada en el cuerpo, llamada fase beta.

Gracias al fenómeno de la pasivación (formación del óxido recubriéndolo), el titanio es altamente resistente a la corrosión. A temperatura ambiente, es resistente a ácidos como el sulfúrico y el clorhídrico. También a temperatura ambiente reacciona de manera sencilla con diversos elementos, como el boro, hidrógeno, oxígeno, etc. Otras de sus propiedades se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del Titanio.

Símbolo Químico	Ti
Número Atómico	22
Densidad	4507 Kg/m <sup>3</sup>
Masa Atómica	47,867 u
Radio Medio	140 pm
Radio Atómico	176
Radio Covalente	136 pm
Configuración Electrónica	[Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>
Estructura Cristalina	Hexagonal
Punto de Fusión	1941 K
Punto de Ebullición	3560 K
Calor de Fusión	15,45 KJ/mol
Presión de Vapor	0,49 Pa a 1933 K
Electronegatividad	1,54
Calor Específico	520 J/Kg-K
Conductividad Eléctrica	2,38x10 <sup>6</sup> S/m
Conductividad Térmica	21,9W/K-m

Fuente: Autores.

**2.1.6 Propiedades del Nitrógeno (N<sub>2</sub>).** Es un gas incoloro, sin olor ni sabor que forma parte de la atmósfera y es un gas no inflamable. A temperaturas elevadas el nitrógeno se combina con metales activos como litio, magnesio y titanio para formar nitruros. El nitrógeno es ligeramente menos pesado que el aire y soluble en agua. A pesar que es comúnmente utilizado como gas inerte, el nitrógeno no lo es, forma óxido nítrico y dióxido de nitrógeno en combinación con el oxígeno, amónico e hidrogeno y sulfuro de nitrógeno en combinación con azufre. En la Tabla 3 se muestran algunas de sus propiedades físicas<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> CRIOGAS. Nitrógeno. [En línea]. <<http://www.criogas.com.mx/productos/nitrogeno/>>. [Citado en 25 de junio de 2013].

Tabla 3. Propiedades del N<sub>2</sub>.

<b>Símbolo Químico</b>	<b>N<sub>2</sub></b>
Peso Molecular	28,013 g/mol
Temperatura de Ebullición (1 atm)	195,8 °C
Temperatura Critica	146,9 °C
Presión Critica	33,9 bar
Densidad Gas (20°C, 1 atm)	1,161 g/l
Peso específico	0,967
Solubilidad en agua (0°C, 1atm)	2,33 cm <sup>3</sup> N <sub>2</sub> /100 cm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O
Calor latente de vaporización	47,44 cal/g

Fuente: Autores.

### 3. EQUIPOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL Y LA MEDICIÓN DEL DESGASTE

A continuación se hará una descripción de los equipos que se utilizaron para realizar el tratamiento superficial de las brocas y las pruebas que permiten determinar el nivel de desgaste en éstas.

#### 3.1 REACTOR MOSMET

Este es el equipo utilizado para realizar el proceso de implantación iónica tridimensional (3DII) en las brocas de acero rápido.

**3.1.1 Generalidades.** Para realizar la implantación iónica de especies metálicas es necesario modificar el dispositivo JUPITER (Joint Universal Plasma and Ion Technologies Experimental Reactor) instalando un sistema de arco eléctrico de manera que se obtenga un tratamiento superficial con descargas simultáneas de arco eléctrico y de alto voltaje a bajas presiones. Esta modificación da origen al reactor MOSMET (Modificación Superficial de Metales) el cual se encuentra en el Laboratorio de Plasma de la Universidad Industrial de Santander.

**3.1.2 Componentes.** A continuación se muestran los componentes principales del reactor MOSMET y las características principales de cada uno de ellos.

Figura 13. Reactor MOSMET: (1) Cámara de descargas, (2) Sistema de vacío, (3) Fuente de alto voltaje, (4) Panel de encendido descarga de arco, (5) Fuente para el arco eléctrico, (6) Panel de control general.



Fuente: Autores.

*Cámara de descargas.* Está fabricada de acero inoxidable AISI 304 con un grosor de 0,5 cm de manera que se aíslen los rayos-X durante su funcionamiento. Tiene una forma semicilíndrica en la parte posterior y plana en la parte frontal donde se encuentra ubicada la puerta de la cámara. Su volumen útil es de 0,3 m<sup>3</sup> lo cual hace que el equipo se considere semi-industrial.

*Sistema de vacío.* Consta de una bomba turbomolecular tipo 01AB-1500-04 con una velocidad de bombeo de 720 litros/s con relación al nitrógeno, la cual trabaja en serie con una bomba rotativa logrando así una presión del orden de 10<sup>-4</sup> Pa en la cámara.

*Fuente de alto voltaje.* Garantiza la generación de pulsos de forma rectangular hacia el cátodo produciendo así un flujo de iones casi monoenergéticos. La amplitud de estos pulsos puede variar entre 5 – 60 KeV con una frecuencia de repetición de 1Hz a 60 Hz. La duración de los pulsos puede variar de 80  $\mu$ s a 2500  $\mu$ s y consumir una potencia media de 2,5 KW.

*Panel de control general.* Consta de cuatro módulos: (a) módulo de alimentación eléctrica, (b) control del sistema de vacío, (c) control de parámetros de descarga y (d) control de flujo de gas. El modulo (a) permite conectar o interrumpir la alimentación eléctrica de todo el equipo, con el modulo (b) se opera y verifica el estado de las bombas turbomolecular y mecánica y se manejan las válvulas que comunican con la cámara de descarga. El modulo (c) permite establecer los parámetros de voltaje, frecuencia y duración de los pulsos de la descarga. Por último con el modulo (d) se controla un dosificador piezoeléctrico que permite variar el flujo de gas.

## **3.2 CENTRO DE MECANIZADO CNC**

Este equipo se utilizará para realizar las pruebas en las brocas de acero rápido tratadas superficialmente y sin tratamiento, perforando el acero API SPECT 5CT P110 para determinar la distancia total perforada por cada una de éstas.

**3.2.1 Generalidades.** El equipo utilizado para realizar la perforación del material de prueba es un centro de mecanizado HERMLE U630S el cual se encuentra ubicado en el taller de mecánica fina de la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC), sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 14. Centro de mecanizado HERMLE U630S.



Fuente: Autores.

**3.2.2 Especificaciones.** El centro de mecanizado está compuesto por el bastidor, la bancada, el cambiador de herramientas, el sistema hidráulico, el sistema de accionamiento y el panel de control. Sus principales especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 4. Datos técnicos HERMLE U630S.

LONGITUD DE LA MESA	900 mm
ANCHO DE LA MESA	528 mm
RECORRIDO EN X	630 mm
RECORRIDO EN Y	500 mm
RECORRIDO EN Z	500 mm
VELOCIDAD DEL HUSILLO	desde 20 rpm hasta 7000 rpm
NUMERO DE HERRAMIENTAS	16
VOLTAJE	380 V
POTENCIA	7,5 KW
LARGO	2400 mm
ANCHO	2000 mm
ALTO	2150 mm
CONTROL	Heidenhain TNC 426M

Fuente: Autores.

## 4. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE EN LAS BROCAS

A continuación se describe el proceso que se siguió para la medición del desgaste de las brocas.

### 4.1 PRUEBAS PRELIMINARES

Inicialmente se utilizaron brocas de acero rápido marca KONDOR las cuales no cuentan con un catálogo de fabricante y por lo tanto no se tiene información sobre sus propiedades físicas ni composición, y se escogió como material para perforar un acero A36.

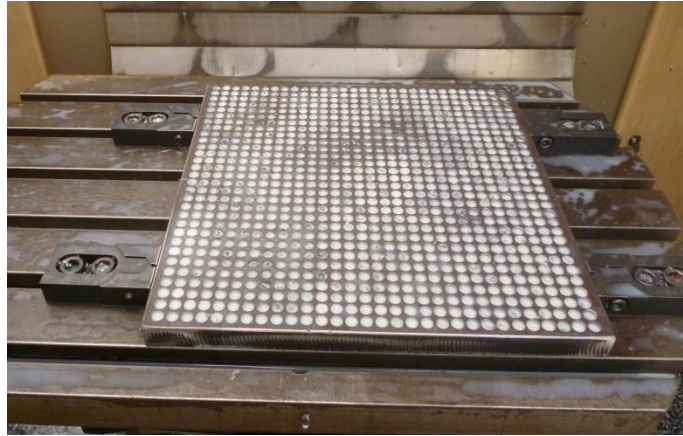
Figura 15. Brocas de acero rápido marca KONDOR.



Fuente: Autores.

A éstas brocas se les aplicó un tratamiento superficial de TiN (5 KV, 5 min) y se probaron bajo las condiciones de corte mostradas en la Tabla 5. Los resultados obtenidos de esta prueba mostraron una gran variación en el número de agujeros realizados por las brocas sin tratamiento, además de un número demasiado alto de agujeros perforados por las brocas con tratamiento superficial de TiN.

Figura 16. Acero A36 perforado.



Fuente: Autores.

Tabla 5. Pruebas realizadas en acero A36.

MATERIAL PERFORADO		A36
LONGITUD Z		17 mm
LUBRICANTE		Taladrina
VELOCIDAD		2500 rpm
AVANCE		40 mm/min
Broca 1	16 huecos	BROCAS SIN RECUBRIMIENTO
Broca 2	44 huecos	
Broca 3	16 huecos	
Broca 4	2 huecos	
Broca 5	25 huecos	
Broca 6	29 huecos	
Broca 7	1546 huecos	TiN ; t=5 min ; V=5KV

Fuente: Autores.

Debido a la gran variación de los datos obtenidos y a la gran cantidad de agujeros perforados por la broca tratada se decidió utilizar un material de mayor dureza de manera que presentara una mayor resistencia al corte y por lo tanto disminuyendo la cantidad de agujeros perforados por la broca tratada superficialmente.

El material escogido para realizar las nuevas pruebas fue el acero API SPECT 5CT P110 el cual es utilizado en tuberías para oleoductos, debido a que se disponía de este material y presentaba una mayor dureza.

Las pruebas en el acero P110 se realizaron con brocas sin tratamiento, brocas tratadas superficialmente con TiN (5 KV, 5 min), Ti (5 KV, 10 min) y TiN (10 KV, 10 min). Los parámetros de corte utilizados y los resultados obtenidos para cada broca se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Pruebas en acero API SPECT 5CT P110.

MATERIAL PERFORADO		P110
LONGITUD Z		17 mm
LUBRICANTE		Taladrina
VELOCIDAD		2500 rpm
AVANCE		40 mm/min
Broca 1	1 hueco	BROCAS SIN RECUBRIMIENTO
Broca 2	4 huecos	
Broca 3	13 huecos	
Broca 4	4 huecos	
Broca 5	1 hueco	
Broca 6	1 hueco	Ti ; t=10 min ; V=5KV
Broca 7	14 huecos	
Broca 8	8 huecos	TiN ; t=5 min ; V= 5 KV
Broca 9	2 huecos	

Fuente: Autores.

Los resultados que se obtuvieron continuaban arrojando una gran variación en el número de agujeros perforados lo cual dificultaba hacer un análisis estadístico del comportamiento del desgaste en las brocas. Por esta razón se decidió disminuir la velocidad de rotación de la broca y realizar una nueva prueba buscando encontrar una menor variación en los resultados. En la Tabla 7 se muestran las nuevas condiciones de corte y los resultados obtenidos bajo estos parámetros.

Tabla 7. Pruebas en API SPECT 5CT P110 bajo nuevos parámetros de corte.

MATERIAL PERFORADO		P110
LONGITUD Z		17 mm
LUBRICANTE		Taladrina
VELOCIDAD		2000 rpm
AVANCE		40 mm/min
Broca 1	9 huecos	BROCAS SIN RECUBRIMIENTO
Broca 2	4 huecos	
Broca 3	4 huecos	
Broca 4	3 huecos	TiN ; t=10 min ; V=10 KV
Broca 5	1 hueco	

Fuente: Autores.

Con estos nuevos parámetros de corte se observó que las brocas sin tratamiento presentaban una menor variación en sus resultados y por otra parte que las brocas sometidas a tratamiento superficial realizaban menos agujeros que las brocas sin tratamiento.

Luego de un análisis de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas se llegó a la conclusión de que el material con el que estaban fabricadas las brocas no era homogéneo y su calidad no era buena lo cual no permitía que se obtuvieran resultados similares en la cantidad de agujeros perforados y además el tratamiento superficial aplicado parecía deteriorar sus propiedades físicas.

Por tal motivo se decidió utilizar brocas de mejor calidad que contaran con un catálogo de fabricante y se tuviera información acerca de su composición y propiedades mecánicas, así como recomendaciones acerca de los parámetros de corte para diferentes materiales. Se escogieron las brocas marca DORMER<sup>15</sup> para realizar las nuevas pruebas y verificar la validez de la conclusión a la cual se llegó anteriormente.

---

<sup>15</sup> DORMER. Catálogo General. 2012.

## 4.2 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORTE

Los parámetros de corte principales que se requiere seleccionar son la velocidad de corte y la velocidad de avance. Debido a que el catálogo DORMER no define un proceso de selección que permita calcular estos parámetros, se utilizan catálogos de otros fabricantes y fuentes de información adicionales para realizar cálculos preliminares y con estos verificar los valores recomendados por el catálogo DORMER.

Figura 17. Broca DORMER.



Fuente: Autores.

El proceso de selección es el siguiente:

- ❖ Se utilizó el catálogo Perforación de Metal de IRWIN para determinar la velocidad de rotación de la broca, para esto se empleó la tabla de velocidades de corte en la cual para un determinado material de trabajo se obtiene un valor de SFM (pies por minuto) que se reemplaza en la fórmula de velocidad dada en este catálogo.
- ❖ De la Tabla 13 se tiene que el contenido de carbono del acero P110 está en un rango de 0.26% a 0.35%, lo que corresponde en la tabla de velocidad de corte (ver Figura 18) a un acero suave (0.2% a 0.3% de carbono) y un SFM entre 80 y 110.

- ❖ Se eligió un SFM de 80 de manera que se obtuviera el valor más bajo de velocidad posible para el rango recomendado. El diámetro de la broca es de 8 mm lo que equivale a 0.315 pulgadas. Reemplazando estos valores en la ecuación dada por el catálogo se obtuvo una velocidad de rotación de 970 rpm.

$$RPM = \frac{SFM * 3,82}{D} = \frac{80 * 3,82}{0,315} = 970$$

Figura 18. Tabla de velocidades de corte IRWIN.

<b>IRWIN.</b>		<b>Perforación de metal</b> Brocas de longitud estándar
<b>Velocidades de corte (según el material de trabajo)</b>		
<b>Velocidades para brocas de acero de corte rápido (HSS)</b>		<b>SFM*</b>
Aluminio y sus aleaciones		200 - 300
Bronce y aleación de cobre y estaño (ordinario)		150 - 300
Bronce (tensión axial alta)		70 - 150
Fundido de matrices (base de zinc)		300 - 400
Fundido en hierro (blando)		100 - 150
Fundido (medio duro)		70 - 100
Duro refrigerado por aire		30 - 40
Maleable		80 - 90
Magnesio y sus aleaciones		250 - 400
Aleación de níquel y cobre o acero alto en níquel		30 - 50
Plásticos y materiales semejantes (Bakelita)		100 - 300
Acero - Suave (de .2 carbono a .3 carbono)		80 - 110
Acero (de .4 carbono a .5 carbono)		70 - 80
Herramienta (1.2 carbono)		50 - 60
Forjaduras		40 - 50
Aleaciones- 300 a 400 dureza Brinell		20 - 30
Tensión axial alta (Termotratada)		
35 a 40 Rockwell C		30 - 40
40 a 45 Rockwell C		25 - 35
45 a 50 Rockwell C		15 - 25
50 a 55 Rockwell C		7 - 15
Acero inoxidable		
Grados de maquinado libre		30 - 80
Grados de acritud		15 - 50
Madera		300 - 400

\*Pies de superficie por minuto (SFM)

$$RPM = \frac{SFM \times 3.82}{\text{Diámetro de la broca}}$$

Fuente: Catálogo IRWIN Perforación de Metal. Página 115.

- ❖ Con este valor de velocidad de rotación se calcula la velocidad de corte de la broca según la ecuación dada en el catálogo DORMER:


$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad \text{Ecuación 3}$$

La velocidad de corte es:

$$V_c = \frac{\pi * 8 * 970}{1000} = 24,38 \text{ m/min}$$

- ❖ Una vez hallada esta velocidad de corte se verifica en la tabla de Velocidades de Corte del catálogo DORMER donde para un diámetro de broca de 8 mm y una velocidad de corte de 25 m/min la velocidad de rotación recomendada es de 995 rpm.

Figura 19. Tabla Velocidades de Corte DORMER.



**Información General**  
**TABLA DE VELOCIDADES DE CORTE**

VELOCIDAD DE CORTE PERIFÉRICA

Metros /Min Pies /Min	5	8	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	150
	16	26	32	50	66	82	98	130	165	197	230	262	296	330	362	495
Diámetro Herramienta	REVOLUCIONES POR MINUTO (RPM)															
mm																
pułg.																
1,00	1592	2546	3138	4775	6366	7958	9549	12732	15916	19099	22282	25465	28648	31831	35014	47747
1,50	1061	1698	2122	3183	4244	5305	6366	8488	10610	12732	14854	16977	19099	21221	23343	31831
2,00	796	1273	1592	2387	3183	3979	4775	6366	7958	9549	11141	12732	14324	15916	17507	23873
2,50	637	1019	1273	1910	2546	3183	3820	5093	6366	7639	8913	10186	11459	12732	14006	19099
3,00	531	849	1061	1592	2122	2653	3183	4244	5305	6366	7427	8488	9549	10610	11671	15916
3,18	500	801	1001	1501	2002	2502	3003	4004	5005	6006	7007	8008	9009	10010	11011	15015
3,50	455	728	909	1364	1819	2274	2728	3638	4547	5457	6366	7176	8185	9095	10004	13642
4,00	398	637	796	1194	1592	1989	2387	3183	3979	4775	5570	6366	7162	7958	8754	11937
4,50	354	566	707	1061	1415	1768	2122	2829	3537	4244	4951	5659	6366	7074	7781	10610
4,76	334	535	669	1003	1337	1672	2006	2675	3344	4012	4681	5350	6018	6687	7356	10031
5,00	318	509	637	955	1273	1592	1910	2546	3183	3820	4456	5093	5730	6366	7003	9549
6,00	285	424	531	796	1061	1326	1592	2122	2653	3183	3714	4244	4775	5305	5836	7958
6,35	251	401	501	752	1003	1253	1504	2005	2506	3008	3509	4010	4511	5013	5514	7519
7,00	227	364	455	682	909	1137	1364	1819	2274	2728	3183	3638	4093	4547	5002	6821
7,94	200	321	401	601	802	1002	1203	1604	2004	2405	2806	3207	3608	4009	4410	6013
8,00	199	318	398	597	796	995	1194	1592	1989	2387	2785	3183	3581	3979	4377	5968
9,00	177	283	354	531	707	884	1061	1415	1768	2122	2476	2829	3183	3537	3890	5305
9,53	167	267	334	501	668	835	1002	1336	1670	2004	2338	2672	3006	3340	3674	5010
10,00	159	255	318	477	637	796	955	1273	1592	1910	2228	2546	2865	3183	3501	4775

Fuente: Catálogo General DORMER. Página 32.

- ❖ El cálculo del avance se realizó con base en la tabla de velocidad de corte y avance del Documento Maquinas Herramientas (ver Tabla 8), donde se tiene que el avance para el acero está dado por:

$$f = \frac{D}{100} \quad \text{Ecuación 4}$$

Por lo tanto el avance es:

$$f = \frac{8}{100} = 0,08 \text{ mm/rev}$$

Tabla 8. Velocidad de corte y avance para diferentes materiales.

Material trabajado	$K_z$ kg/mm <sup>2</sup>	$v$ m/min	$a$ mm/vuelta
Fundición.....	12 a 22	35 a 25	$d/50$
Fundición de cilindros.....	22 a 28	22 a 15	$15d/1000$
Acero dulce.....	35 a 65	38 a 25	$d/100$
Acero duro.....	65 a 90	25 a 14	$d/100$
Acero muy duro.....	90 a 120	18 a 14	$d/100$
Bronce, latón y cobre.....	23 a 50	60 a 25	$d/100$
Aluminio, electrón, duraluminio....	14 a 26	250 a 80	$15d/1000$

Fuente: Documento Maquinas Herramientas de la web Apuntes Técnicos.

- ❖ Con este valor de avance se verifica en la tabla de avances del catálogo DORMER (Tabla 9) que para una broca de 8 mm de diámetro hay un valor recomendado de 0,08 mm/rev. Una vez determinado el avance se calcula la velocidad de avance de acuerdo con la ecuación del catálogo DORMER.

$$V_f = n * f \quad \text{Ecuación 5}$$

Por lo tanto la velocidad de avance es:

$$V_f = 995 * 0,08 = 79,6 \text{ mm/min}$$

Tabla 9. Tabla de avances DORMER.

Fn	HM		HSS HM		HSS		HSS-E																	
	Ø(D)	1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm	8mm	10mm	12mm	15mm	16mm	20mm	25mm	30mm	40mm	50mm							
A	0.012	0.023	0.029	0.032	0.036	0.042	0.054	0.062	0.069	0.082	0.086	0.110	0.125	0.135	0.155	0.175								
B	0.014	0.028	0.037	0.041	0.046	0.053	0.067	0.080	0.090	0.103	0.108	0.135	0.153	0.165	0.188	0.208								
C	0.015	0.032	0.044	0.050	0.056	0.064	0.080	0.098	0.110	0.125	0.130	0.160	0.180	0.195	0.220	0.240								
D	0.016	0.038	0.053	0.060	0.068	0.078	0.098	0.119	0.130	0.149	0.155	0.188	0.210	0.228	0.253	0.275								
E	0.017	0.043	0.062	0.071	0.080	0.092	0.115	0.140	0.150	0.173	0.180	0.215	0.240	0.260	0.285	0.310								
F	0.018	0.050	0.073	0.084	0.095	0.109	0.138	0.165	0.178	0.202	0.210	0.248	0.275	0.295	0.320	0.343								
G	0.019	0.056	0.084	0.096	0.109	0.126	0.160	0.190	0.205	0.231	0.240	0.280	0.310	0.330	0.355	0.375								
H	0.020	0.066	0.102	0.116	0.130	0.150	0.190	0.228	0.243	0.271	0.280	0.320	0.355	0.375	0.398	0.418								
I	0.021	0.076	0.119	0.134	0.150	0.173	0.220	0.265	0.280	0.310	0.320	0.360	0.400	0.420	0.440	0.460								
J	0.024	0.084	0.135	0.152	0.170	0.197	0.250	0.298	0.315	0.349	0.360	0.405	0.445	0.465	0.485	0.503								
K	0.026	0.092	0.150	0.170	0.190	0.220	0.280	0.330	0.350	0.388	0.400	0.450	0.490	0.510	0.530	0.545								
L	0.028	0.101	0.165	0.186	0.208	0.240	0.305	0.360	0.385	0.419	0.430	0.485	0.525	0.545	0.568	0.588								
M	0.030	0.110	0.180	0.202	0.225	0.260	0.330	0.390	0.420	0.450	0.460	0.520	0.560	0.580	0.605	0.630								
N	0.032	0.119	0.195	0.218	0.242	0.280	0.355	0.420	0.455	0.481	0.490	0.555	0.595	0.615	0.642	0.672								
S	0.008	0.014	0.020	0.025	0.030	0.037	0.050	0.080	0.100	0.123	0.130	0.150												
T	0.015	0.028	0.040	0.050	0.060	0.070	0.090	0.110	0.130	0.160	0.170	0.190												
U	0.026	0.048	0.070	0.080	0.090	0.107	0.140	0.170	0.200	0.223	0.230	0.240												
V	0.038	0.069	0.100	0.115	0.130	0.153	0.200	0.250	0.280	0.310	0.320	0.340												
W	0.049	0.089	0.130	0.150	0.170	0.200	0.260	0.330	0.380	0.418	0.430	0.450												
X	0.056	0.103	0.150	0.180	0.210	0.250	0.330	0.420	0.480	0.533	0.550	0.580												
Y	0.068	0.124	0.180	0.220	0.260	0.317	0.430	0.550	0.700	0.700	0.700	0.740												
Z	0.094	0.172	0.250	0.325	0.400	0.533	0.800	1.000	1.100	1.175	1.200	1.200												

mm/N ± 25%

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D}$$

$$V_f = n \times f \times n$$

Fuente: Catálogo General DORMER.

De acuerdo con esto los parámetros de corte para realizar las pruebas de desgaste en las brocas son:

Tabla 10. Parámetros de corte.

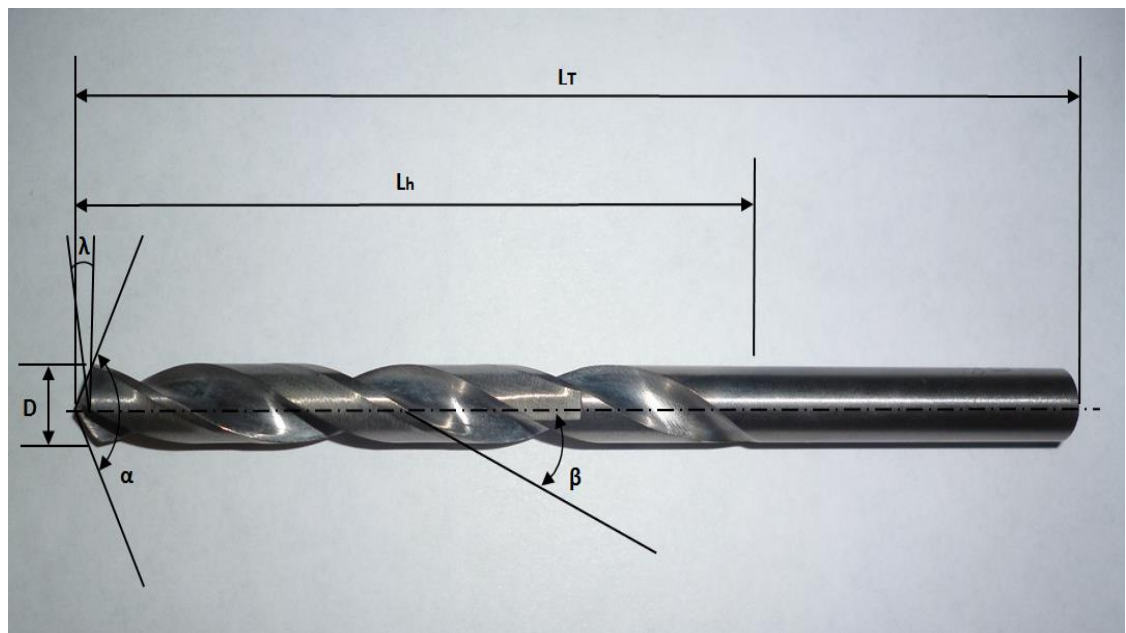
Velocidad de rotación [rpm]	n	995
Velocidad de corte [m/min]	Vc	25
Avance [mm/rev]	f	0,08
Velocidad de avance [mm/min]	Vf	76,9

Fuente: Autores.

### 4.3 GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LAS BROCAS

Para la realización de este proyecto se utilizaron brocas de acero rápido marca DORMER de 8 mm de diámetro, de tipo largo ya que su relación Longitud/Diámetro es mayor que 3 y con un espesor del alma convencional lo cual permite un gran desalajo de la viruta. En la Figura 20 se muestran las principales características geométricas de las brocas.

Figura 20. Geometría de las brocas.



Fuente: Autores.

Tabla 11. Geometría de las brocas.

<b>Diámetro D [mm]</b>	8	<b>Ángulo de filo <math>\alpha</math></b>	118°
<b>Longitud de hélice L<sub>h</sub> [mm]</b>	77	<b>Ángulo de hélice <math>\beta</math></b>	27°
<b>Longitud Total L<sub>T</sub> [mm]</b>	117	<b>Ángulo de incidencia <math>\lambda</math></b>	33,7°

Fuente: Autores

Las brocas de acero rápido se caracterizan por su alta resistencia al desgaste y dureza en caliente por lo cual son utilizadas con mucha frecuencia en el sector metalmeccánico para las operaciones de taladrado. La composición química y las propiedades mecánicas del acero rápido con que están fabricadas se pueden ver en la Tabla 12.

Tabla 12. Propiedades del acero rápido.

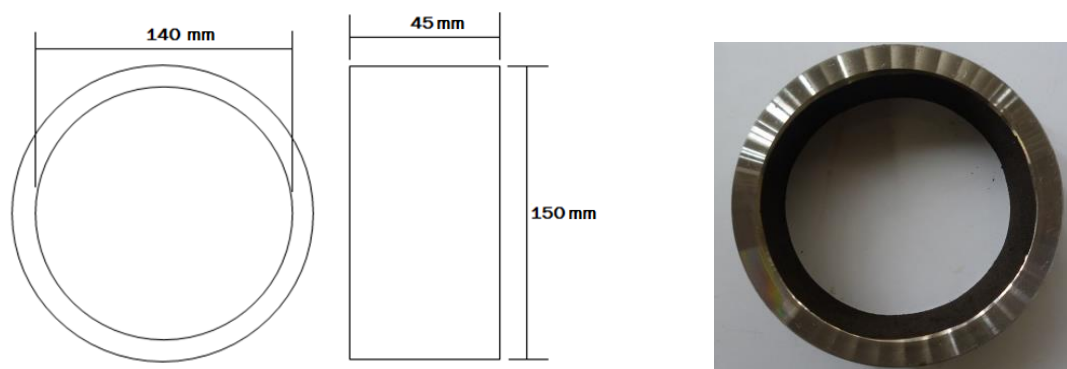
ACERO RÁPIDO AISI M2							
PROPIEDADES MECÁNICAS		COMPOSICIÓN QUÍMICA [%]					
Módulo de elasticidad	260 - 300 [KN/mm <sup>2</sup> ]	C	Mn	Cr	Mo	V	W
Densidad	8,0 - 9,0 [g/cm <sup>3</sup> ]						
Dureza	800 - 960 [HV30]						
Resistencia al calor	550 [°C]	0,85	0,30	4,15	5,00	1,95	6,40
Límite de compresión	3000 - 4000 [N/mm <sup>2</sup> ]						
Límite de flexión	2500 - 4000 [N/mm <sup>2</sup> ]						

Fuente: Catálogo general DORMER.

#### 4.4 GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE A TALADRAR

El material escogido para taladrar son anillos de tubería de acero API SPECT 5CT Grado P110 utilizada en el sector petrolero y de los hidrocarburos, el cual se escogió por su alta dureza y resistencia al corte.

Figura 21. Geometría de material a taladrar.



Fuente: Autores.

Tabla 13. Propiedades Acero API SPECT 5CT P110.

NORMATIVA	API SPECT 5CT	CATEGORÍA								P110	
PROPIEDADES MECÁNICAS		COMPOSICIÓN QUÍMICA [%]									
Límite de tracción [Mpa]	965	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
Límite de fluencia [Mpa]	758	0,26 -0,35	0,17 -0,37	0,4 -0,7	≤ 0,02	≤ 0,01	0,8 -1,1	≤ 0,2	≤ 0,2	0,15 -0,25	≤ 0,08
Dureza [HB]	270										

Fuente: <http://www.xytpipe.es/2-3-oil-casing-steel-pipe.html>.

#### 4.5 PROCESO DE IMPLANTACIÓN DE Ti Y TiN

A continuación se describen los procedimientos y condiciones que se requieren para realizar la implantación iónica tridimensional (3DII) en las brocas de acero rápido.

**4.5.1 Preparación de las brocas.** Antes de realizar la implantación iónica las brocas se someten a un tratamiento de limpieza superficial llamado Sputtering, mediante el cual se remueven algunos de los átomos de la superficie debido a la colisión de los iones con los átomos del blanco, de manera que se eliminen residuos o impurezas que puedan alterar el proceso.

**4.5.2 Condiciones de implantación.** La implantación de las brocas se realizó en dos grupos: las implantadas con titanio y las implantadas con nitruro de titanio, en cada uno de estos grupos se realizaron tratamientos a un mismo voltaje de 10KV y a dos tiempos de exposición de la superficie diferentes (4 y 8 min).

Los parámetros de implantación para cada tratamiento se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 14. Condiciones de implantación con nitruro de titanio. a) 10KV – 4 min, b) 10KV - 8 min.

a). 10 KV – 4 min.

Tratamiento # 1		
Sputtering	Argón	t= 15 min.
Voltaje	5 Kv	
Presión	1.95 - 2.00 Pa	
Implantación	Ti + N	t= 4 min.
Voltaje	10 Kv	
Duración pulso	0.25 ms	
Frecuencia	30 Hz	
Varco	16 - 17 V	
Iarco	150 A	
Presión	1.18 - 1.22 Pa	

b). 10 KV – 8 min.

Tratamiento # 2		
Sputtering	Argón	t= 15 min.
Voltaje	5 Kv	
Presión	1,90 – 2,00 Pa	
Implantación	Ti + N	t= 8 min.
Voltaje	10 Kv	
Duración pulso	0.25 ms	
Frecuencia	30 Hz	
Varco	17 - 18 V	
Iarco	150 A	
Presión	1,00 - 1,20 Pa	

Fuente: Autores.

Tabla 15. Condiciones de implantación con titanio. a) 10KV – 4min, b) 10KeV - 8min.

a). 10 KV – 4 min.

b). 10 KV – 8 min.

Tratamiento # 3		
Sputtering	Argón	t= 15 min.
Voltaje	5 Kv	
Presión	1.85 - 1.95 Pa	
Implantación	Titanio	t= 4 min.
Voltaje	10 Kv	
Duración pulso	0.25 ms	
Frecuencia	30 Hz	
Varco	20 - 22 V	
Iarco	150 A	
Presión	0.024 Pa	

Tratamiento # 4		
Sputtering	Argón	t= 15 min.
Voltaje	5 Kv	
Presión	1.9 Pa	
Implantación	Titanio	t= 8 min.
Voltaje	10 Kv	
Duración pulso	0.25 ms	
Frecuencia	30 Hz	
Varco	20 - 22 V	
Iarco	150 A	
Presión	0.080 - 0.098 Pa	

Fuente: Autores.

**4.5.3 Número de brocas a implantar.** La Implantación Iónica Tridimensional se realizará a tres brocas por cada uno de los cuatro tratamientos, lo cual resulta en un total de 12 brocas implantadas. Además se realizarán pruebas con tres brocas sin tratamiento superficial de manera que se utilizaran 15 brocas en total para llevar a cabo el estudio del desgaste.

Tabla 16. Número total de brocas.

TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NÚMERO DE BROCAS
Ti ; 10 kV ; 4 min	3
TiN ; 10 kV ; 4 min	3
Ti ; 10 kV ; 8 min	3
TiN ; 10 kV ; 8 min	3
Sin Tratamiento	3
<b>TOTAL</b>	<b>15</b>

Fuente: Autores.

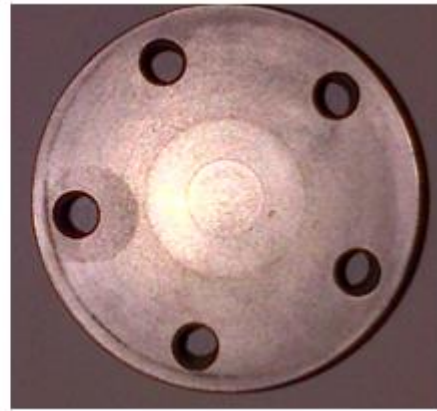
**4.5.4 Proceso de operación del reactor MOSMET.** A continuación se describe el procedimiento que se sigue para realizar la implantación de nitruro de titanio en las brocas utilizando el reactor MOSMET.

1. Limpieza superficial de las brocas con alcohol y pulido del cátodo porta-muestras.

Figura 22. a) Porta-muestras sin pulir, b) Porta-muestras pulido.

a). Cátodo de titanio.

b). Cátodo de titanio pulido.



Fuente: Autores.

Figura 23. Máquina pulidora.



Fuente: Autores.

Figura 24. Limpieza de brocas.



Fuente: Autores.

2. Introducción de las brocas al reactor MOSMET y cierre de la cámara.

Figura 25. Ubicación de las brocas dentro de la cámara de descargas.

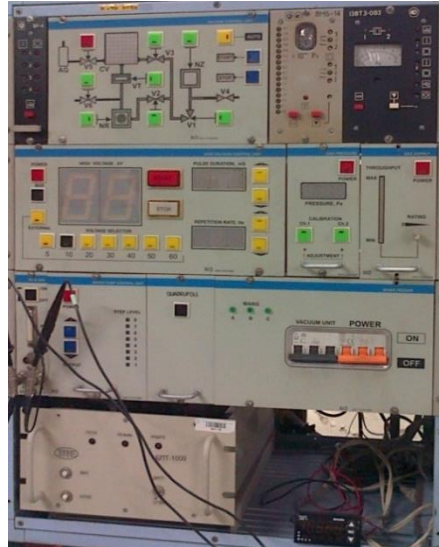


Fuente: Autores.

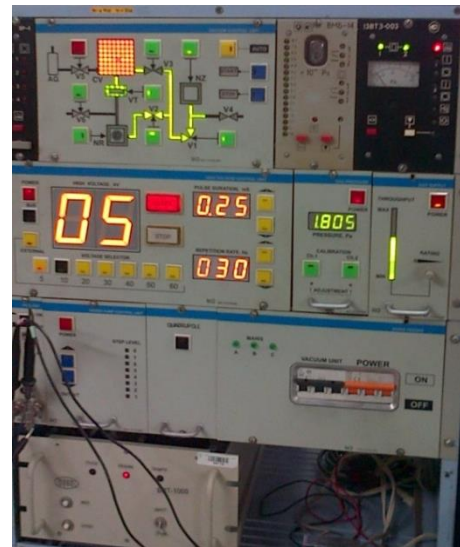
3. Encendido del reactor.

Figura 26. a) Reactor apagado, b) Reactor encendido.

a).



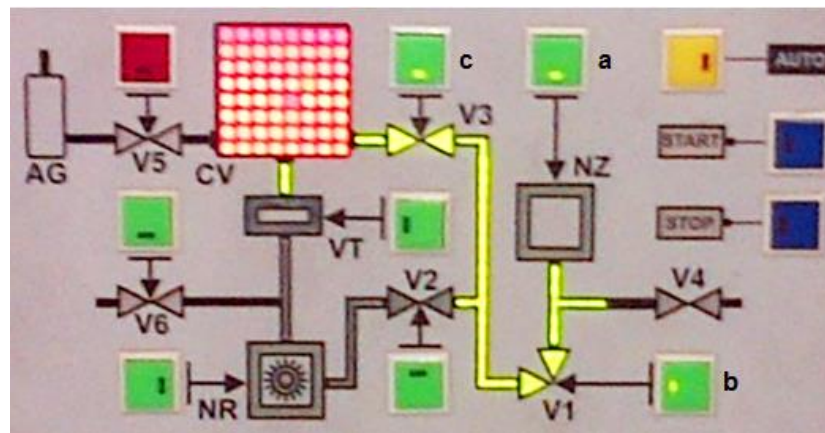
b).



Fuente: Autores.

#### 4. Proceso de vacío con la bomba mecánica.

Figura 27. a) Encendido de la bomba mecánica Nz, b) Activación de la válvula V1 para realizar vacío en esta línea, c) Activación de válvula V3 para hacer vacío en la cámara hasta 6 Pa.

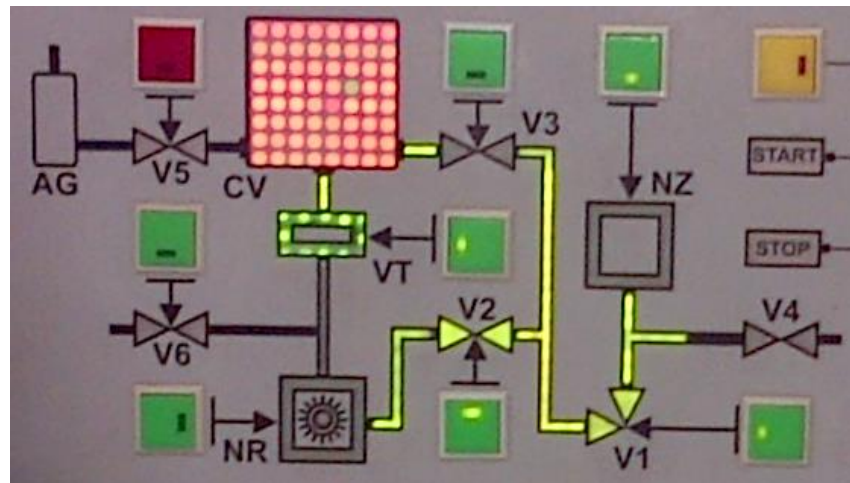


Fuente: Autores.

5. Encendido de la bomba turbomolecular.

Se oprime V3 para cerrarla, luego se oprime V2, y al abrirse ésta se abre también V3 para luego abrir la válvula de intercomunicación VT, cuando esta hace su apertura total se cierra V3. Luego de esta secuencia se oprime el interruptor de encendido BKП de la bomba turbomolecular (Figura 29).

Figura 28. Activación de válvulas para el encendido de la bomba turbomolecular.



Fuente: Autores.

Figura 29. Encendido de la bomba turbomolecular.



Fuente: Autores.

6. Se llega al vacío de operación (aproximadamente 0,024 Pa) para iniciar el proceso de limpieza o Sputtering de la superficie de la broca (Figura 30).

Figura 30. Entrada en operación de la bomba turbomolecular.

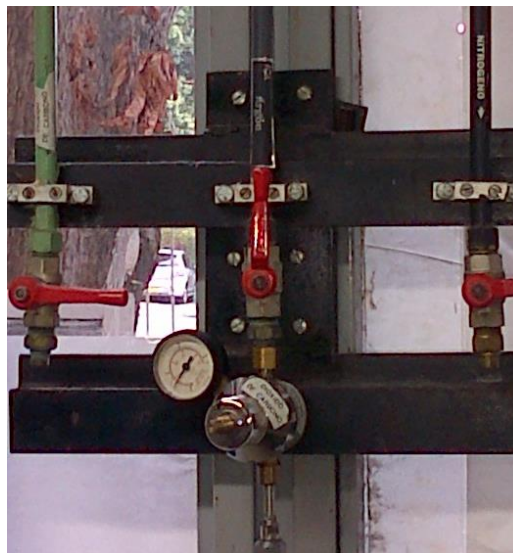


Fuente: Autores.

7. Proceso de Sputtering con argón.

En la Figura 31 se abre la válvula para el paso del argón desde el cilindro hacia la cámara de descargas.

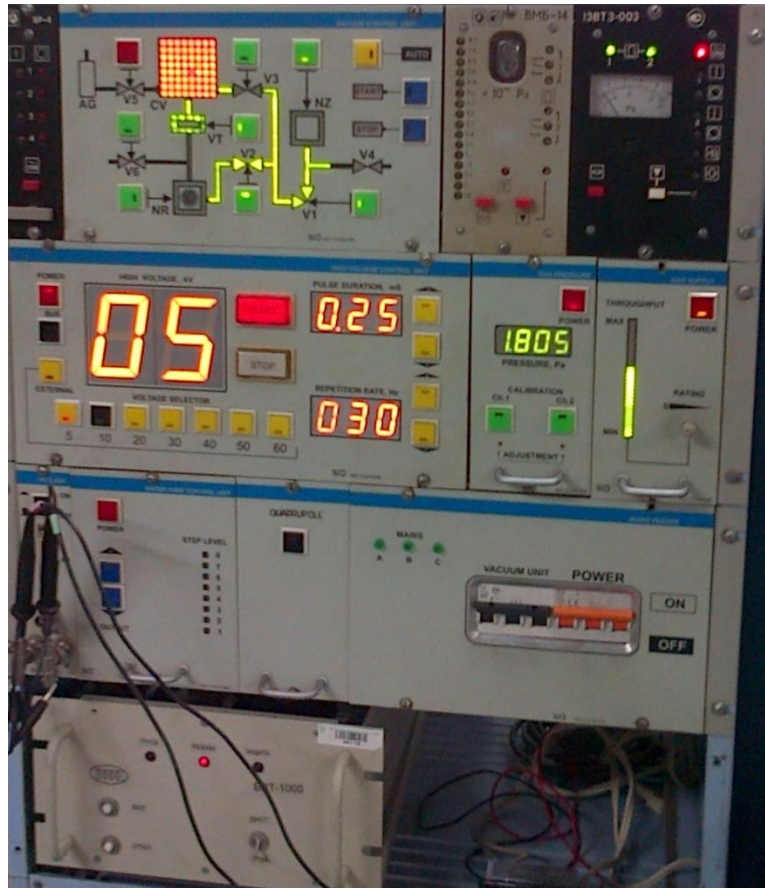
Figura 31. Apertura de válvula.



Fuente: Autores.

En la Figura 32 se oprime el botón START para encender la fuente de alto voltaje una vez que la bomba turbomolecular ha llegado a su presión de operación.

Figura 32. Encendido de la fuente.

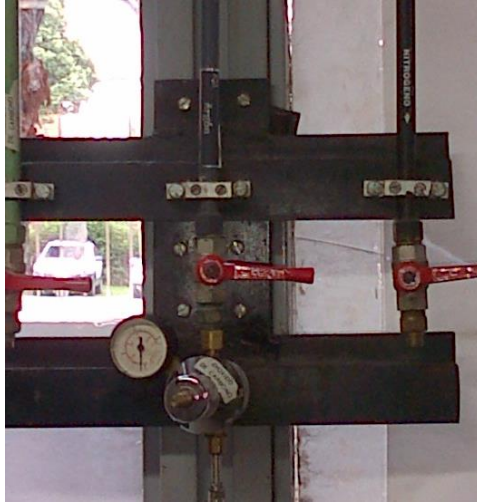


Fuente: Autores.

#### 8. Proceso de retirada del argón de la cámara.

Una vez finalizado el Sputtering se cierra la válvula de la pipeta de argón y se espera hasta que la presión del manómetro llegue a cero para su desconexión como se ve en la Figura 33.

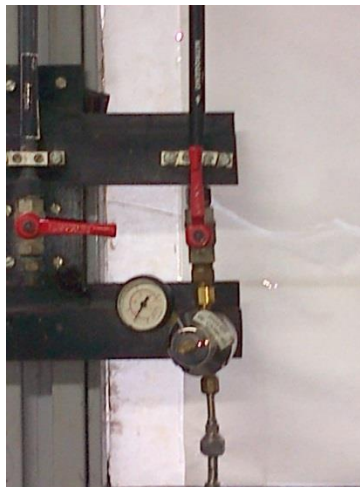
Figura 33. Cierre de la válvula de argón.



Fuente: Autores.

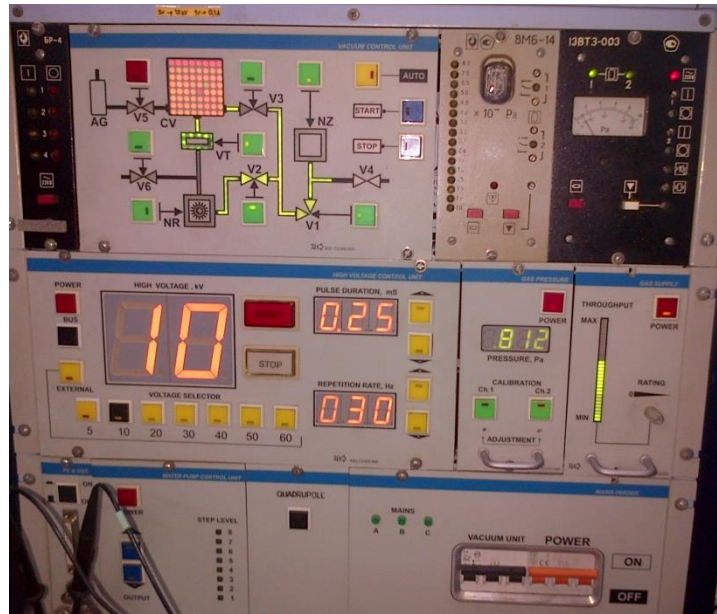
9. Apertura de la válvula para entrada de nitrógeno a la cámara (Figura 34), cambio de voltaje a 10 KV (Figura 35).

Figura 34. Apertura de válvula.



Fuente: Autores.

Figura 35. Cambio de voltaje de la fuente de alto voltaje.



Fuente: Autores.

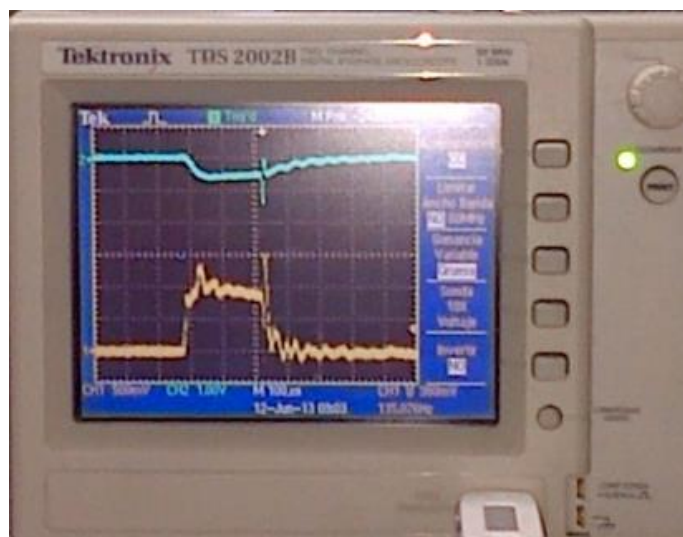
10. Encendido de la fuente para generar el arco y realizar el proceso de implantación (Figura 36) y calibración del pulso en el osciloscopio (Figura 37).

Figura 36. Fuente de arco eléctrico.



Fuente: Autores.

Figura 37. Osciloscopio.



Fuente: Autores.

El tiempo del proceso de implantación depende del tipo de tratamiento que se desee obtener, en este caso se trabajó con tiempos de 4 y 8 minutos para cada tratamiento.

El procedimiento descrito anteriormente se utiliza solo para la implantación de nitruro de titanio, en el caso de la implantación de titanio se ejecutan los mismos pasos excepto el número 9 que se refiere a la apertura de la válvula de nitrógeno debido a que para este tratamiento no es necesario utilizar este gas.

Una vez finalizado el proceso se observa el cambio en la superficie de las brocas, las implantadas con nitruro de titanio presentan un color dorado, las implantadas con titanio de color plateado y más brillante que las brocas sin tratamiento como se observa en la Figura 38.

Figura 38. Superficie de las brocas. a) Broca sin tratamiento, b) Broca implantada con TiN a 10KV – 4min, c) Broca implantada con Ti a 10KV – 4min, d) Broca implantada con TiN a 10KV – 8min, e) Broca implantada con Ti a 10KV – 8min.

a) Broca sin tratamiento superficial.



b) Broca implantada con TiN a 10 KV y 4 min.



c) Broca implantada con Ti a 10 KV y 4 min.



d) Broca implantada con TiN a 10 KV y 8 min.



e) Broca implantada con Ti a 10 KV y 8 min.



Fuente: Autores.

#### 4.6 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE

El desgaste en el filo de las brocas se medirá en función de la distancia total taladrada, para lo cual se realizarán pruebas perforando agujeros de 22 mm de profundidad en anillos de acero API SPECT 5CT P110 con cada una de las brocas tratadas superficialmente y sin tratamiento (ver Figura 39), utilizando un centro de mecanizado de manera que los parámetros de operación con los que se trabaje sean los seleccionados anteriormente.

Figura 39. Perforación de anillos de API SPECT 5CT P110.



Fuente: Autores.

En cada anillo de acero API SPECT 5CT P110 se perforaron 70 agujeros (35 por cada cara) lo que equivale a una distancia taladrada de 1, 54 metros (Figura 40).

Figura 40. Anillo de API SPECT 5CT P110 perforado.

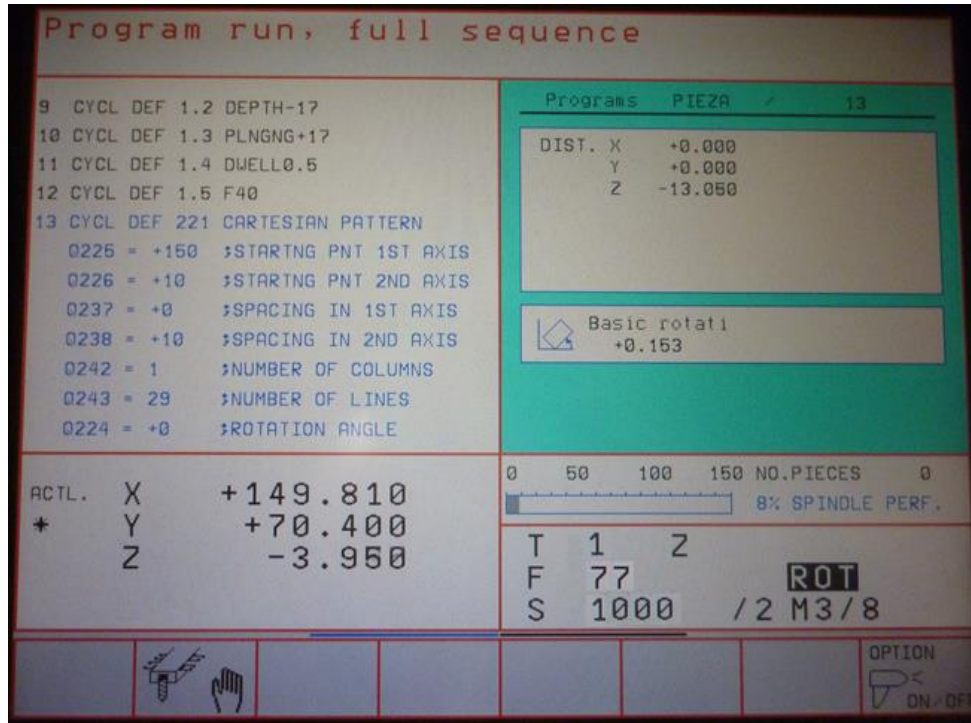


Fuente: Autores.

Las pruebas se hicieron de manera que la broca perforara la longitud total del agujero en una sola entrada, lo cual genera un mayor aumento de la temperatura en la punta y además la producción de viruta más larga aumentando así el desgaste del filo.

El criterio utilizado para determinar la condición de desgaste en las brocas fue el incremento de la potencia requerida para realizar la perforación, este incremento se observa en el tablero de control del centro de mecanizado (ver Figura 41) donde indica un porcentaje del 5% para la realización de los primeros agujeros y se produce un incremento hasta un porcentaje de 19% donde se detiene la perforación ya que el filo de la broca se encuentra desgastado (Figura 42).

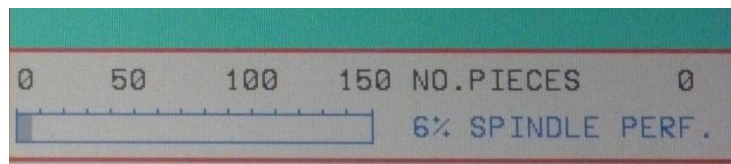
Figura 41. Panel de control del centro de mecanizado.



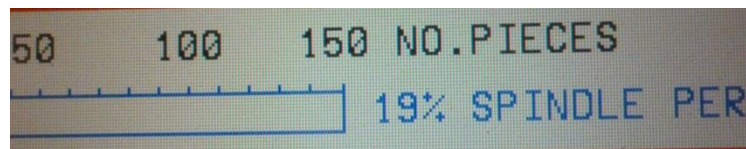
Fuente: Autores.

Figura 42. Incremento de potencia.

a). Potencia con el filo de la broca nuevo.



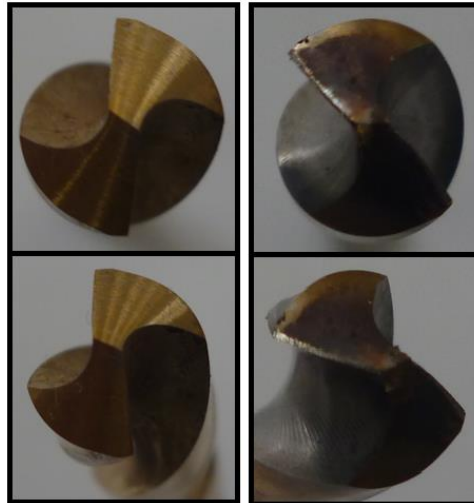
b). Potencia con el filo de la broca desgastado.



Fuente: Autores.

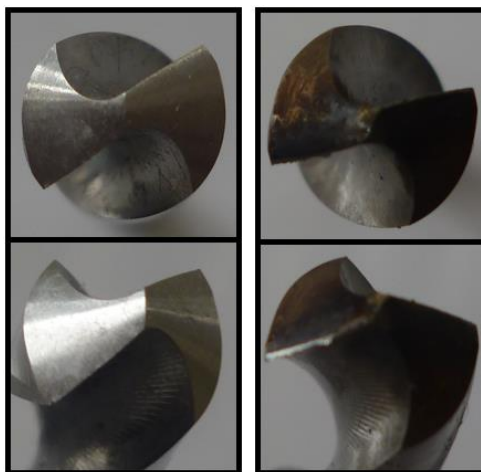
En las Figuras 43 a 46 se observa el filo de corte desgastado de las brocas implantadas con nitruro de titanio y las implantadas con titanio y las condiciones de tratamiento superficial de cada una.

Figura 43. Filo de corte brocas implantadas con TiN (10KV, 4min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado.



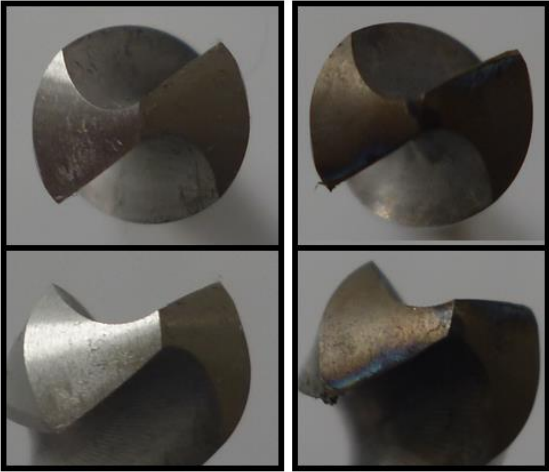
Fuente: Autores.

Figura 44. Filo de corte brocas implantadas con Ti (10KV, 4min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado.



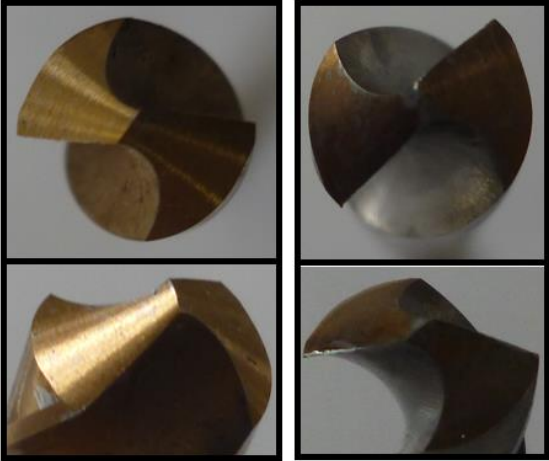
Fuente: Autores.

Figura 45. Filo de corte brocas implantadas con Ti (10KV, 8 min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado.



Fuente: Autores.

Figura 46. Filo de corte brocas implantadas con TiN (10KV, 8 min). a) Filo nuevo, b) Filo desgastado.



Fuente: Autores.

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE DE LAS BROCAS.

En esta sección se discutirán los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste por medio de la herramienta estadística ANOVA.

### 5.1 COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES GRUPOS DE BROCAS PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE USANDO UN EXPERIMENTO UNIFACTORIAL COMPLETAMENTE ALEATORIZADO

A continuación se presentan los resultados obtenidos después de llevar a cabo las pruebas de desgaste en los diferentes grupos de brocas incluidas las blancas o brocas sin recubrimiento con el fin de validar o rechazar las hipótesis que se plantearan más adelante.

Tabla 17. Datos de las pruebas realizadas.

TRATAMIENTO SUPERFICIAL		BROCA # 1		BROCA # 2		BROCA # 3	
		AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]
Sin Tratamiento		67	1,474	70	1,540	64	1,408

TRATAMIENTO SUPERFICIAL		BROCA # 1		BROCA # 2		BROCA # 3	
		AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]
Implantación	TiN	105	2,310	118	2,596	112	2,464
Voltaje	10 KV						
Tiempo	4 min						

TRATAMIENTO SUPERFICIAL		BROCA # 1		BROCA # 2		BROCA # 3	
		AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]
Implantación	Ti	90	1,980	94	2,068	86	1,892
Voltaje	10 KV						
Tiempo	4 min						

TRATAMIENTO SUPERFICIAL		BROCA # 1		BROCA # 2		BROCA # 3	
Implantación	Ti	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]
Voltaje	10 KV	102	2,244	93	2,046	108	2,376
Tiempo	8 min						

TRATAMIENTO SUPERFICIAL		BROCA # 1		BROCA # 2		BROCA # 3	
Implantación	TiN	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]	AGUJEROS PERFORADOS	LONGITUD TALADRADA [m]
Voltaje	10 KV	125	2,750	117	2,574	129	2,838
Tiempo	8 min						

Fuente: Autores.

Los requerimientos para desarrollar un experimento totalmente aleatorio son:

- Una variable independiente o factor.
- Varios niveles o tratamientos de la variable independiente.
- Ningún ruido.
- Aplicación aleatoria de los tratamientos.

**5.1.1 Numero de huecos perforados por cada broca.** Con el fin de tener un adecuado control de los datos obtenidos al momento de realizar las pruebas de desgaste de los diferentes especímenes en el centro de mecanizado CNC, se procedió a tabular el número de huecos realizados por cada una de las brocas con el fin de organizarlos.

Tabla 18. Número de huecos perforados por cada broca.

TRATAMIENTO SUPERFICIAL	NÚMERO DE HUECOS		
10 KeV ; 4 min Ti	90	94	86
10 KeV ; 8 min Ti	102	93	108
10 KeV ; 4 min TiN	105	118	112
10 KeV ; 8 min TiN	125	117	129
Sin Tratamiento	67	70	64

Fuente: Autores.

**5.1.2 Desgaste en función de la longitud total taladrada.** De las pruebas de desgaste realizadas en las brocas, es de interés para el experimento unifactorial completamente aleatorizado la distancia total taladrada por cada una de ellas. Por tal motivo el número total de huecos taladrados por cada broca se multiplica por 22 mm y con ello obtenemos la longitud total perforada Tabla 19, que es el valor de interés con el que se trabajará en el desarrollo del experimento.

Tabla 19. Distancia taladrada en [m].

TRATAMIENTO SUPERFICIAL	DISTANCIA TALADRADA [m]		
10 KeV ; 4 min Ti	1,98	2,068	1,892
10 KeV ; 8 min Ti	2,244	2,046	2,376
10 KeV ; 4 min TiN	2,31	2,596	2,464
10 KeV ; 8 min TiN	2,75	2,574	2,838
Sin Tratamiento	1,474	1,54	1,408

Fuente: Autores.

**5.1.3 Planteamiento de hipótesis.** El problema a solucionar se basa en que la resistencia al desgaste y por ende la vida útil de la herramienta de corte sin ser afilada, de una broca HSS marca DORMER al perforar una sección de tubería API P110 en un CNC es función de las condiciones de implantación establecidas en el Capítulo 4.

Se establecen las hipótesis para el experimento unifactorial completamente aleatorizado con el fin de observar la varianza o invariancia de los resultados de interés al comparar las brocas blancas y las implantadas con el fin de validar o no dichas hipótesis.

#### **Hipótesis experimento unifactorial completamente aleatorizado**

**H0:** con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , todas las modificaciones superficiales darán el mismo resultado en la resistencia al desgaste de las brocas.

**H1:** con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , por lo menos una de las modificaciones superficiales dará un resultado diferente en la resistencia al desgaste de las muestras.

**5.1.4 Análisis de varianza (ANOVA).** Suponga que se tienen  $a$  tratamientos o niveles diferentes de un solo factor que quieren compararse. La respuesta observada de cada uno de los  $a$  tratamientos es una variable aleatoria. Los datos aparecerán como en la Tabla 20. Una entrada de la Tabla 20 (por ejemplo,  $y_{ij}$ ) representa la observación  $j$ -ésima tomada bajo el nivel del factor o tratamiento  $i$ . Habrá, en general,  $n$  observaciones bajo el tratamiento  $i$ -ésimo<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> Douglas C. Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. México: Limusa, 2004. pág. 63.

Tabla 20. Arreglo típico de un experimento completamente aleatorizado.

Tratamiento (nivel)	Observaciones				Totales	Promedios
1	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1n}$	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2n}$	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$a$	$y_{a1}$	$y_{a2}$	...	$y_{an}$	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Fuente: Autores.

En donde la Ecuación 6 es la suma de las observaciones de cada tratamiento  
Tabla 20.

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \text{Ecuación 6}$$

La Ecuación 7 es el resultado de la relación entre la suma de las observaciones de  
cada tratamiento y el número de réplicas de cada uno.

$$\bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n} \quad \text{Ecuación 7}$$

Esta ecuación es simplemente la suma de los totales de cada tratamiento.

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \text{Ecuación 8}$$

En la siguiente ecuación se tiene el cociente entre la suma de los totales de cada  
tratamiento y el número total de observaciones realizadas.

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$i = 1, 2, \dots, a$$

El modelo estadístico o modelo de los efectos sirve para describir las observaciones del experimento, dicho modelo se describe con la siguiente ecuación.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde  $y_{ij}$  es una variable aleatoria que denota la observación ij-ésima,  $\mu$  es un parámetro común a todos los tratamientos llamado la media global,  $\tau_i$  es un parámetro asociado con el tratamiento i-ésimo llamado el efecto del tratamiento i-ésimo, y  $\varepsilon_{ij}$  es un componente del error aleatorio.

En la siguiente tabla se observa la disposición general de los datos en un análisis de varianza cuyo objetivo final es calcular el factor  $F_0$  y compararlo con un factor  $F_t$  que sale de la tabla estadística ANOVA con significancia de  $\alpha=0.05$ , para validar o rechazar las hipótesis.

Tabla 21. Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$
Entre los tratamientos	$SS_{\text{Tratamientos}}$	$a-1$	$MS_{\text{Tratamientos}}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E}$
Error (dentro de los tratamientos)	$SS_E$	$N-a$	$MS_E$	
Total	$SS_T$	$N-1$		

Fuente: Autores.

En la Ecuación 11 se tiene que N: es el número total de observaciones o en este caso es el número total de brocas, a: es el número de tratamientos y n: es el número de réplicas de cada tratamiento.

$$N = a \times n \quad \text{Ecuación 11}$$

La Ecuación 12 no es más que la sumatoria de cuadrados de los 15 valores tabulados menos el cociente entre la suma de totales al cuadrado y N.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_n^2}{N} \quad \text{Ecuación 12}$$

En la siguiente ecuación se tiene la sumatoria de los cuadrados de los totales de cada tratamiento, multiplicada por la relación 1/n donde n es el número de réplicas de cada tratamiento, y todo esto se resta con la suma de totales al cuadrado de la Tabla 20 dividido en N.

$$SS_{TRATAMIENTOS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_n^2}{N} \quad \text{Ecuación 13}$$

La ecuación que se tiene a continuación es simplemente la diferencia entre los valores antes calculados.

$$SS_E = SS_T - SS_{TRATAMIENTOS} \quad \text{Ecuación 14}$$

En la Ecuación 15 se tiene el cociente entre la suma de cuadrados de los tratamientos y la diferencia entre (a-1) que no es otra cosa más que los grados de libertad del tratamiento.

$$MS_{TRATAMIENTOS} = \frac{SS_{TRATAMIENTOS}}{a-1} \quad \text{Ecuación 15}$$

Y por último se ve la relación entre la suma de cuadrados del error y diferencia entre (N-a) que simplemente es el grado de libertad del error.

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-a} \quad \text{Ecuación 16}$$

Las ecuaciones presentadas anteriormente sirven de apoyo para trabajar con los datos obtenidos en el experimento, con el fin de realizar el análisis estadístico se dispone de la siguiente tabla donde tenemos los resultados obtenidos al medir el desgaste de los diferentes especímenes bajo unos parámetros de corte preestablecidos. En la siguiente tabla se observa la suma de los totales así como la suma de los promedios.

Tabla 22. Datos de las distancias totales taladradas.

TRATAMIENTO SUPERFICIAL	DISTANCIA TALADRADA [m]			TOTAL	PROMEDIO
10 KeV ; 4 min Ti	1,98	2,068	1,892	5,94	1,98
10 KeV ; 8 min Ti	2,244	2,046	2,376	6,666	2,222
10 KeV ; 4 min TiN	2,31	2,596	2,464	7,37	2,45666667
10 KeV ; 8 min TiN	2,75	2,574	2,838	8,162	2,72066667
Sin Tratamiento	1,474	1,54	1,408	4,422	1,474
				32,56	2,17066667

Fuente: Autores.

Es de tener en cuenta los siguientes aspectos para la realización del experimento totalmente aleatorizado:

**VARIABLE INDEPENDIENTE:** Tratamiento superficial aplicado a la brocas.

**VARIABLE DEPENDIENTE:** Distancia taladrada total de las brocas.

Tabla 23. Cantidades de tratamientos y replicas por tratamiento.

<b>Número de Tratamientos</b>	<b>a</b>	<b>5</b>
<b>Número de observaciones por tratamiento</b>	<b>n</b>	<b>3</b>

Fuente: Autores.

La siguiente tabla es la del ANOVA, que como se mencionó antes nos ayuda a encontrar el  $F_C$ , con el fin de compararlo con el  $F_T$  de la tabla de significancia  $\alpha=0.05$ .

Tabla 24. Análisis de varianza experimento completamente aleatorio.

TABLA ANOVA					
FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	$\sigma^2$	$F_C$	$F_T$
Tratamientos	4	2,725888	0,681472	43,5463918	3,478
Error	10	0,156493333	0,01564933		
Total	14	2,882381333			

Fuente: Autores.

Una vez se tiene el valor del  $F_C$ , se busca el  $F_T$  de la siguiente tabla en la cual se entra en las filas con el grado de libertad del denominador o del error y en las columnas con el grado de libertad del numerador o de los tratamientos.

Tabla 25. Selección del  $F_T$ .

		g.d.l					
		1	2	3	4	5	6
enominador	1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0
	2	18,513	19,000	19,164	19,247	19,296	19,330
	3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941
	4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163
	5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,050	4,950
	6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284
	7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866
	8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,687	3,581
	9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374
	10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217
	11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095
	12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996
	13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915
	14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848

Fuente: Autores.

Si  $F_{cal} < F_{tabla}$  entonces  $H_0$  se admite y por ende los tratamientos superficiales no tienen ningún efecto en el aumento de la resistencia al desgaste por parte de las brocas, en caso contrario  $H_0$  se rechaza y se procede a realizar el análisis Duncan para buscar el mejor o el peor tratamiento mediante comparaciones pareadas de las medias de los tratamientos.

**5.1.5 Análisis Duncan.** Una vez estudiados los valores obtenidos experimentalmente de la resistencia al desgaste por parte de las brocas, se observa que por lo menos uno de los tratamientos aplicados ofrece resultados diferentes, es de interés realizar comparaciones entre los mismos con el fin de determinar los efectos de los tratamientos en la vida del filo de la broca y así ampliar el rango de conclusiones del experimento.

Para realizar el análisis Duncan se trabaja con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{error} = \sqrt{\frac{MSE}{n}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$Duncan_{ajustado} = valor\ Duncan \times \sigma_{error} \quad \text{Ecuación 18}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de la varianza y desviación del error, este último es el que se multiplica por el Duncan de la tabla para obtener el Duncan ajustado que se usa para hacer las comparaciones pareadas.

Tabla 26. Valores de varianza y desviación.

<b>Varianza del error [<math>\sigma^2_{Error}</math>]</b>	0,01564933
<b>Desviación del error [<math>\sigma_{Error}</math>]</b>	0,07222496

Fuente: Autores.

La Tabla 27 muestra el análisis Duncan, en la misma se han organizado de mayor a menor las medias de las distancias totales taladradas para cada tratamiento con el fin de realizar comparaciones por pares. Siendo así las letras T representan:

T5: Representa el tratamiento 10 KeV ; 8 min. ;TiN.

T4: Representa el tratamiento 10 KeV ; 4 min. ;TiN.

T3: Representa el tratamiento 10 KeV ; 8 min. ;Ti.

T2: Representa el tratamiento 10 KeV ; 4 min. ;Ti.

T1: Representa las brocas sin recubrimiento.

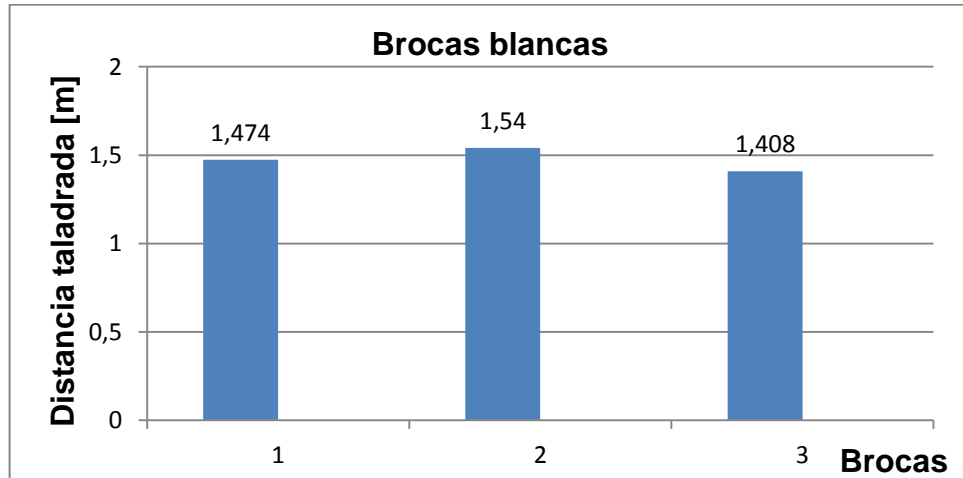
Tabla 27. Tabla Duncan.

PROMEDIOS	DIFERENCIA DE PROMEDIOS	VALOR DUNCAN	DUNCAN AJUSTADO	CONCLUSIÓN
T5 2,720666667	T5-T1 1,246666667	3,43	0,2477316	T5>T1
T4 2,456666667	T5-T2 0,740666667	3,376	0,24383146	T5>T2
T3 2,222	T5-T3 0,498666667	3,293	0,23783678	T5>T3
T2 1,98	T5-T4 0,264	3,151	0,22758084	T5>T4
T1 1,474	T4-T1 0,982666667	3,376	0,24383146	T4>T1
	T4-T2 0,476666667	3,293	0,23783678	T4>T2
	T4-T3 0,234666667	3,151	0,22758084	T4>T3
	T3-T1 0,748	3,293	0,23783678	T3>T1
	T3-T2 0,242	3,151	0,22758084	T3>T2
	T2-T1 0,506	3,151	0,22758084	T2>T1

Fuente: Autor.

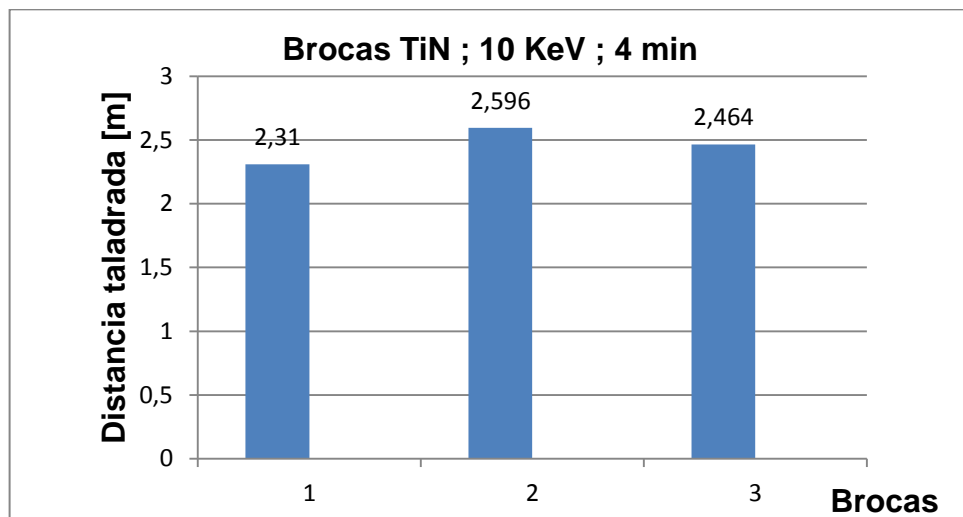
**5.1.6 Discusión de resultados.** En las Figuras 47 a 51 se grafica el comportamiento de la distancia total taladrada de cada uno de los tipos de muestras trabajados en el presente trabajo de grado.

Figura 47. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas sin implantación.



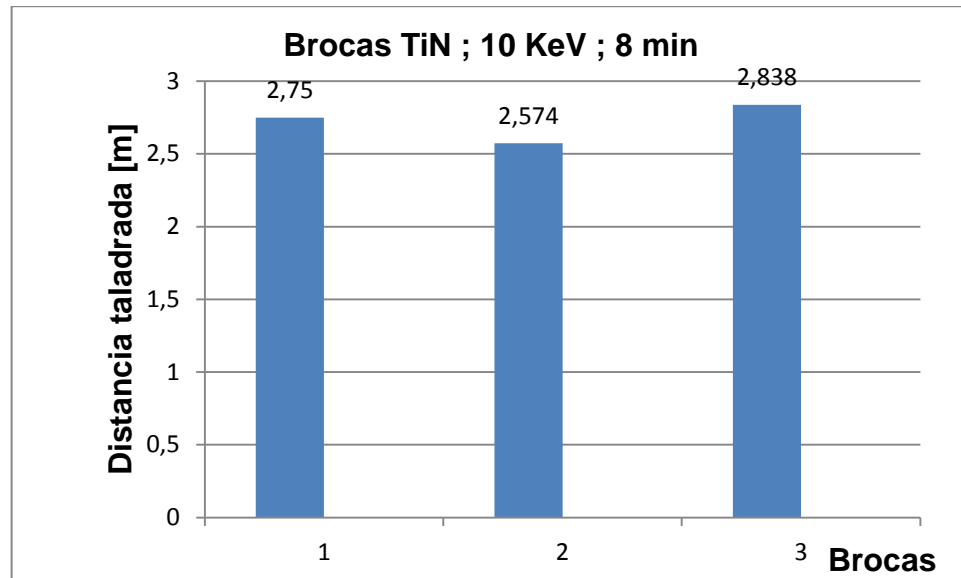
Fuente: Autores.

Figura 48. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con TiN y 4 min.



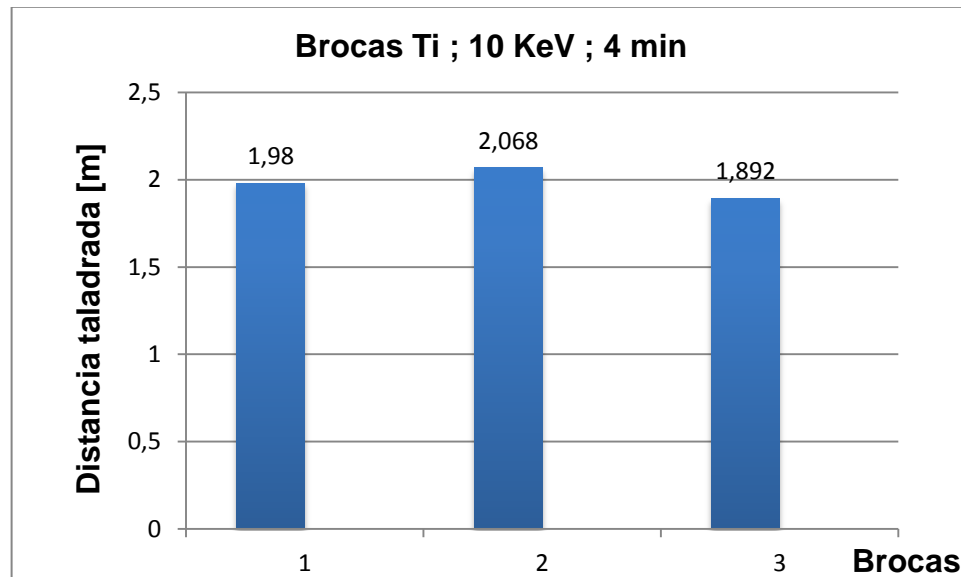
Fuente: Autores.

Figura 49. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con TiN y 8 min.



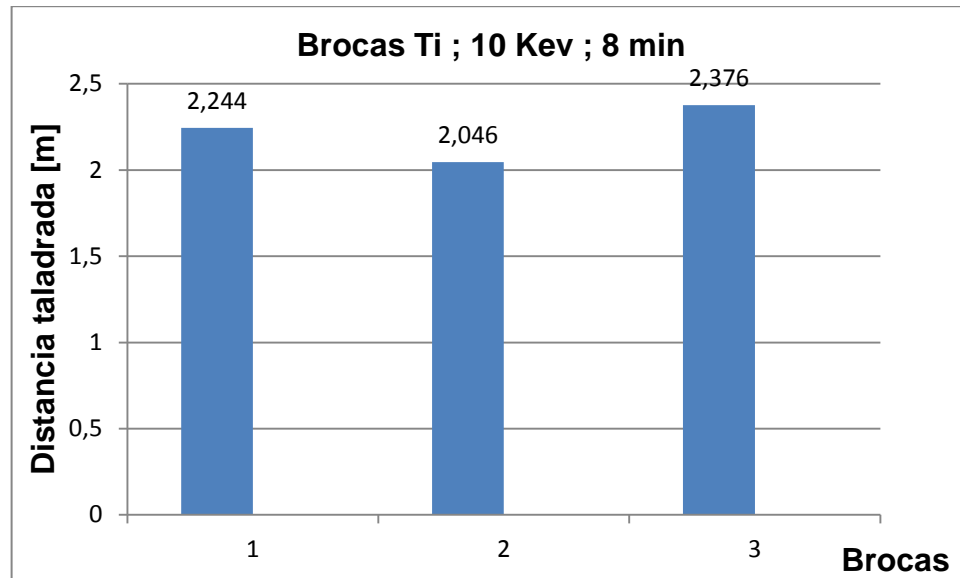
Fuente: Autores.

Figura 50. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con Ti y 4 min.



Fuente: Autores.

Figura 51. Distancia taladrada vs brocas, para las brocas implantadas con Ti y 8 min.



Fuente: Autores.

Al analizar los datos graficados se puede realizar una comparacion entre tratamientos a manera de porcentaje, definiendo que con el tratamiento de Ti a 4 minutos se obtiene una mejora del 34% en la longitud taladrada, el de Ti a 8 minutos obtiene una mejora del 50%, el de TiN 4 minutos mejora en un 66% y el de TiN 8 minutos obtiene una mejora del 84%.; valores vallidos solo para las condiciones de la presente investigacion.

## 5.2 EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS RECUBRIMIENTOS TI Y TIN EN LAS BROCAS PARA LA MEDICIÓN DE DESGASTE USANDO UN EXPERIMENTO FACTORIAL

El objetivo de realizar un experimento factorial en esta fase del proceso, se debe a la necesidad de investigar todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Es decir se quiere averiguar cuál de las condiciones de implantación genera un mayor aumento en la resistencia al desgaste en las brocas.

Los requerimientos para desarrollar un experimento factorial son:

- Dos o más variables independientes o factores.
- Varios niveles para cada factor.
- Ningún ruido.
- Aplicación aleatoria de los tratamientos.
- Los experimentos factoriales son la única forma de descubrir interacciones entre variables.

**5.2.1 Número de huecos perforados por cada broca.** Ya que para este tipo de experimento solo se van a trabajar con los datos de las brocas implantadas se hace necesario trabajar con la Tabla 28 en la cual se muestran de forma ordenada y clara los resultados de las pruebas de desgaste hechas en el centro de mecanizado CNC.

Tabla 28. Número de huecos perforados por las brocas implantadas.

CONDICIONES DE IMPLANTACIÓN	NÚMERO DE HUECOS					
	Ti			TiN		
10 KeV ; 4 min	90	94	86	105	118	112
10 KeV ; 8 min	102	93	108	125	117	129

Fuente: Autores.

**5.2.2 Desgaste en función de la longitud total taladrada.** De las pruebas de desgaste realizadas en las brocas, es de interés para el experimento factorial la distancia total taladrada por cada una de ellas. Por tal motivo el número total de huecos taladrados por cada broca se multiplica por 22 mm y con ello obtenemos la longitud total perforada (Tabla 29), que es el valor de interés con el que se trabajará en el desarrollo del experimento.

Tabla 29. Distancia taladrada en [m].

CONDICIONES DE IMPLANTACIÓN	DISTANCIA TALADRADA [m]							
	Ti				TiN			
10 KeV ; 4 min	1,98	2,068	1,892	5,94	2,31	2,596	2,464	7,37
10 KeV ; 8 min	2,244	2,046	2,376	6,666	2,75	2,574	3	8,162

Fuente: Autores.

**5.2.3 Planteamiento de hipótesis.** El problema a solucionar se basa en que la resistencia al desgaste y por ende la vida útil de la herramienta de corte sin ser afilada, de una broca HSS marca DORMER al perforar una sección de tubería API P110 en un CNC es función de las condiciones de implantación establecidas en el capítulo 2 y más específicamente del tipo de material implantado y del tiempo de exposición de la muestra.

Se establecen las hipótesis para el experimento factorial con el fin de observar la varianza o invarianza de los resultados de interés al comparar las condiciones de implantación de las brocas con el fin de validar o no dichas hipótesis.

## **Hipótesis experimento factorial.**

### **Factor A**

**Ho:** con nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , Todos los tiempos de exposición de las muestras darán el mismo resultado en la resistencia al desgaste.

**H1:** con nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , por lo menos un tiempo de exposición de las muestras dará un resultado diferente en la resistencia al desgaste.

### **Factor B**

**Ho:** con nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , todos los tipos de material implantado darán el mismo resultado en la resistencia al desgaste.

**H1:** con nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , por lo menos un tipo de material implantado dará un resultado diferente en la resistencia al desgaste.

### **Interacción**

**Ho:** con nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , no hay interacción entre factores.

**H1:** con nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , existe interacción.

**5.2.4 Análisis de varianza (ANOVA).** Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o replica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Por ejemplo, si el factor A tiene a niveles y el factor B tiene b niveles, cada replica contiene todas las ab combinaciones de los tratamientos<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Douglas C. Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. México: Limusa, 2004. pág. 170.

Para el caso general de un experimento factorial, sea  $y_{ijk}$  la respuesta observada cuando el factor A tiene el nivel  $i$ -ésimo ( $i=1,2,\dots, a$ ) y el factor B tiene el nivel  $j$ -ésimo ( $j=1,2,\dots, b$ ) en la réplica  $k$ -ésima ( $k=1,2,\dots, n$ ) en general, el experimento factorial de dos factores como el de este trabajo aparecerá como en la Tabla 30.

El orden en que se hacen las  $abn$  observaciones se selecciona al azar, por lo que este diseño es un diseño completamente aleatorizado<sup>18</sup>.

Tabla 30. Arreglo general de un diseño factorial de dos factores.

		Factor B			
		1	2	...	b
Factor A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	⋮				
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$

Fuente: Autores.

Para realizar el arreglo general de un diseño factorial de dos factores se aplican cada una de las siguientes ecuaciones. En la siguiente ecuación se observa el total de cada una de las observaciones bajo el nivel  $i$ -ésimo del factor a, o en otras palabras la suma total de cada fila si se trabaja con el arreglo anterior.

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad \text{Ecuación 19}$$

<sup>18</sup> Douglas C. Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. México: Limusa, 2004. pág. 177.

La Ecuación 20 representa el cociente entre la suma total y el número de observaciones que se encuentran en cada fila, es decir el promedio de cada renglón.

$$\bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{bn} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad \text{Ecuación 20}$$

La ecuación que se presenta a continuación denota el total de observaciones bajo el nivel j-esimo del factor b, o en otras palabras la suma total de cada columna si se trabaja con el arreglo anterior.

$$y_{.j} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad j = 1, 2, \dots, b \quad \text{Ecuación 21}$$

La Ecuación 22 arroja el promedio en el nivel j del factor b, o en otras palabras la media de las columnas.

$$\bar{y}_{.j} = \frac{y_{.j}}{an} \quad j = 1, 2, \dots, b \quad \text{Ecuación 22}$$

La siguiente ecuación arroja el total de la celda ij-esima, o en otras palabras el total de las observaciones de cada nivel de los factores.

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, b \quad \text{Ecuación 23}$$

Al igual que para el caso del experimento completamente aleatorizado, para el factorial también existe un modelo de los efectos que sirve para describir las observaciones que se presentan en el mismo. Tal modelo se describe con la siguiente ecuación.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde  $\mu$  es el efecto promedio global,  $\tau_i$  es el efecto del nivel  $i$ -ésimo del factor A de las filas,  $\beta_j$  es el efecto del nivel  $j$ -ésimo del factor B de las columnas,  $(\tau\beta)_{ij}$  es el efecto de la interacción entre  $\tau_i$  y  $\beta_j$ , y  $\varepsilon_{ijk}$  es un componente del error aleatorio.

En la siguiente tabla se observa la disposición general de los datos en un análisis de varianza para un experimento factorial, cuyo objetivo final es calcular el valor  $F_0$  para cada factor y la interacción de los mismos, con el fin de compararlos con los factores  $F_t$  que se obtienen de la tabla estadística ANOVA con significancia de  $\alpha=0.05$ , para validar o rechazar cada una de las hipótesis planteadas.

Tabla 31. Tabla de análisis de varianza para el diseño factorial de dos factores.

Fuente de variación	Suma de cuadrado	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$
Tratamientos A	$SS_A$	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamientos B	$SS_B$	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	$SS_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SS_E$	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	$SS_T$	$abn - 1$		

Fuente: autores.

La Ecuación 25 no es más que la sumatoria de cuadrados de los 12 valores tabulados menos el cociente entre la suma de totales al cuadrado y el producto del número de niveles de cada factor y  $n$ .

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \text{Ecuación 25}$$

En la siguiente ecuación se tiene la sumatoria de los cuadrados de los totales de cada nivel del factor a, multiplicada por la relación  $1/bn$  donde n es el número de réplicas de cada nivel y b es el número de columnas, y todo esto se resta del cociente entre la suma de totales al cuadrado y el producto del número de niveles de cada factor y n.

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \text{Ecuación 26}$$

En la Ecuación 27 se tiene la sumatoria de los cuadrados de los totales de cada nivel del factor b, multiplicada por la relación  $1/an$  donde n es el número de réplicas de cada nivel y a es el número de filas, y todo esto se resta del cociente entre la suma de totales al cuadrado y el producto del número de niveles de cada factor y n.

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \text{Ecuación 27}$$

La ecuación que se tiene a continuación representa la suma de cuadrados de los subtotales, valor necesario para calcular la suma de cuadrados de las interacciones. Dicha ecuación nos es más que la sumatoria de los cuadrados de los totales de cada nivel de cada factor multiplicado por la relación de  $1/n$ , menos el cociente entre el total general al cuadrado y el producto del número de niveles de cada factor y n.

$$SS_{Subtotales} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad \text{Ecuación 28}$$

La siguiente ecuación entrega la suma de cuadrados de las interacciones, esto es igual a la suma de cuadrados de los subtotales menos la suma de cuadrados de cada factor.

$$SS_{AB} = SS_{Subtotales} - SS_A - SS_B \quad \text{Ecuación 29}$$

Por último la suma de cuadrados del error es igual a la suma de cuadrados total menos la suma de cuadrados de las interacciones y cada factor.

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad \text{Ecuación 30}$$

En la Tabla 31 se presentan las ecuaciones de cada uno de los cuadrados medios, así como las ecuaciones que nos permiten calcular cada uno de los Fc, valor por el cual hemos hecho todo este recorrido.

En la siguiente tabla se organizan cada uno de los datos recolectados en las pruebas de las brocas implantadas, con el fin de realizar el análisis estadístico. La misma es equivalente al arreglo general para un experimento factorial.

Tabla 32. Datos de las distancias totales taladradas por las brocas implantadas.

CONDICIONES DE IMPLANTACIÓN	DISTANCIA TALADRADA [m]								TOTAL	PROMEDIO
	Ti				Tin					
10 KeV ; 4 min	1,98	2,068	1,892	5,94	2,31	2,596	2,464	7,37	13,31	2,21833333
10 KeV ; 8 min	2,244	2,046	2,376	6,666	2,75	2,574	3	8,162	14,828	2,47133333
	TOTAL			12,606	TOTAL			15,532	28,138	
	PROMEDIO			2,101	PROMEDIO			2,5886667		

Fuente: Autores.

Para llevar a cabo el experimento factorial hay que tener en cuenta lo siguiente:

**Variables independientes.**

**Factor A:** tiempo de exposición de la muestra.

**Factor B:** tipo de material implantado.

**Variable dependiente:** distancia total taladrada por las brocas implantadas.

Tabla 33. Cantidad de niveles por factor y réplicas por factor.

<b>Niveles del Factor A</b>	<b>a</b>	2
<b>Niveles del Factor B</b>	<b>b</b>	2
<b>Numero de replicas</b>	<b>n</b>	3

Fuente: Autores.

La siguiente tabla es la del ANOVA para el experimento factorial, que como se mencionó antes ayuda a encontrar los  $F_c$ , con el fin de compararlos con los  $F_T$  de la tabla de significancia  $\alpha=0.05$  según el caso.

Tabla 34. Análisis de varianza experimento factorial.

<b>ANOVA</b>					
<b>FUENTE DE VARIACION</b>	<b>GRADOS DE LIBERTAD</b>	<b>SUMA DE CUADRADOS</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b>FC</b>	<b>FT</b>
Factor A	1	0,192027	0,192027	10,3951965	5,318
Factor B	1	0,713456333	0,71345633	38,6222707	5,318
Interacción	1	0,000363	0,000363	0,01965066	5,318
Error	8	0,147781333	0,01847267		
Total	11	1,053627667			

Fuente: Autores.

Una vez se tiene los valores de los  $F_c$ , se buscan los  $F_T$  de la siguiente tabla en la cual se entra en las filas con el grado de libertad del denominador o del error y en las columnas con el grado de libertad del numerador o de los tratamientos.

Tabla 35. Selección del  $F_T$ .

g.d.l	1	2	3	4
1	161,4	199,5	215,7	224,6
2	18,513	19,000	19,164	19,247
3	10,128	9,552	9,277	9,117
4	7,709	6,944	6,591	6,388
5	6,608	5,786	5,409	5,192
6	5,987	5,143	4,757	4,534
7	5,591	4,737	4,347	4,120
8	5,318	4,459	4,066	3,838
9	5,117	4,256	3,863	3,633
10	4,965	4,103	3,708	3,478

Fuente: Autores.

Como se observa en la tabla ANOVA el  $F_c$  de los factores es mayor al de la tabla de Fisher, por lo tanto se rechaza la hipótesis  $H_0$ . Por otra parte para las interacciones vemos que el  $F_c < F_t$ , entonces se acepta la hipótesis nula.

**5.2.5 Análisis Duncan.** En este caso la existencia de solo dos niveles por factor, impide la realización del análisis Duncan, en vez de este proceso se procede a evaluar las medias de cada nivel y elegir la de mayor promedio como la mejor característica dentro del factor.

### FACTOR A.

A continuación se muestran los datos promedios de las distancias taladradas para el factor del tiempo de exposición de la muestra.

Tabla 36. Valores promedios de las distancias taladradas para el tiempo de exposición.

CONDICIONES DE IMPLANTACIÓN	PROMEDIO
10 KeV ; 4 min	2,21833333
10 KeV ; 8 min	2,47133333

Fuente: Autores.

Como se observa en la anterior tabla el promedio para el tiempo de 8 minutos es mayor que el de 4 minutos, por tal motivo se dice que el tiempo de 8 minutos es el que ofrece mejor resistencia al desgaste de la herramienta de corte.

#### **FACTOR B.**

En la siguiente tabla se muestran los datos promedios de las distancias taladradas para el factor del tipo de material implantado en las muestras.

Tabla 37. Valores promedios de las distancias taladradas para el tipo de material implantado.

Ti		TiN	
PROMEDIO	2,101	PROMEDIO	2,58866667

Fuente: Autores.

Como se observa en la tabla anterior el promedio para la implantación con el material TiN es mayor que para la hecha con Ti, por tal motivo se dice que la implantación con nitruro de titanio ofrece una mejor resistencia al desgaste de las brocas que para el caso de la implantación de titanio.

## INTERACCIÓN.

Para el caso de las interacciones se observa que el  $F_c < F_T$ , por tal motivo la hipótesis nula  $H_0$  se acepta y se dice que no existen interacción entre los factores trabajados en la presente tesis de grado.

Tabla 38. Valores para la FC y FT de las interacciones.

ANOVA					
FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	$\sigma^2$	FC	FT
Interacción	1	0,000363	0,000363	0,01965066	5,318

Fuente: Autores.

## 5.3 PRESUPUESTO

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto general del proyecto:

Tabla 39. Presupuesto.

Papelería (Memorias, cartas, fotocopias, carpetas, borradores, empastes, etc.).	\$ 150.000.00
Bibliografía (Libros de consulta, manuales).	150.000.00
Transporte.	250.000.00
Compra de material, preparación y aplicación del proceso de recubrimiento.	1'250.000.00
Análisis del desgaste en la superficie de las piezas bajo estudio.	1'000.000.00
Producción intelectual.	3'500.000.00
Asesoría Ing. Isnardo González (Asumido por la UIS).	1'500.000.00
Otras asesorías Magister Ely Dannier V. Niño	1'500.000.00
Subtotal.	\$ 9'300.000.00
Imprevistos (10%).	930.000.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 10'230.000.00</b>

Fuente: Autores.

## 6. CONCLUSIONES

Como proyecto de investigación que busca estudiar la aplicación de un proceso novedoso de implantación (3DII), se diseñó y desarrollo un experimento que permitió evaluar el desgaste de brocas expuestas a descargas híbridas a bajas presiones y altos voltajes, implantadas con Ti y TiN variando los parámetros del mismo, contribuyendo en las áreas de desgaste en las herramientas de corte y la modificación superficial.

Se emplearon herramientas estadísticas con el fin de cumplir con el desarrollo del experimento y como ejemplo de aplicación real de la asignatura metodología de la investigación, tales como el diseño y ejecución de un experimento completamente aleatorizado y otro factorial con sus respectivos análisis ANOVA y DUNCAN, utilizando como medio de trabajo hojas de Excel con su respectiva programación matemática que harán de la enseñanza de este tema algo más sencillo para el estudiante.

Después de realizar el proceso de implantación, se concluyó que la modificación superficial a 20 [KeV], presenta inestabilidad en el proceso debido a la dificultad de controlar la dosis a implantar dando como resultado superficies mal implantadas.

Por medio de herramientas estadísticas se comprobó y valido la eficacia de la implantación híbrida como proceso que ayuda a la mejora de la resistencia al desgaste de las brocas, así como también se corroboró la dependencia tanto del tiempo de exposición como de la energía de penetración usados en el proceso de modificación superficial.

Después de realizar pruebas preliminares en brocas marca KONDOR debido a su reducido valor, se vio como al realizar la modificación superficial en dichas herramientas se afectó de cierta manera la resistencia al desgaste de las mismas ocasionando una reducida o casi nula longitud de corte. Dicha disminución en la resistencia puede ser ocasionada por la mala calidad de las brocas KONDOR, ya que al estandarizar el proceso gracias a estos resultados se observó una gran mejoría cuando se utilizan brocas de mayor calidad.

Gracias al desarrollo de la presente investigación, no solo se fortalece el vínculo entre las escuelas de mecánica y física, sino que también se crean bases para un futuro estudio de la viabilidad del uso de la implantación tridimensional como proceso que ayude a la mejora en la resistencia al desgaste de las herramientas de corte.

## BIBLIOGRAFIA

DORMER. Catálogo General.[En línea]. [Citado en 15 de abril de 2013]. Disponible en internet: <http://www.dormertools.com/SANDVIK/2531/Internet/Spanish/S004466.nsf?OpenDatabase>.

MENA GALVIS, Ronald Leandro y VILLAMIZAR SIERRA, Sergio Giovanny. Diseño y desarrollo experimental del comportamiento de piezas metálicas de mecanización con y sin recubrimiento de TiN mediante un proceso PVD, sometidas a desgaste. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. 126p.

MITSUBISHI MATERIALS. Datos Técnicos [En línea]. Tokio. [Citado en 20 de octubre de 2012]. Disponible en internet: [http://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c\\_n\\_other/c004sp\\_datos\\_tecnicos.pdf](http://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c004sp_datos_tecnicos.pdf).

MONTGOMERY, Douglas C. y RUNGER, George C. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México: Limusa Wiley, 2008, p. 561-577.

PATIÑO RODRIGUEZ, Carmen Elena y MARTHA DE SOUZA, Gilberto Francisco. Análisis de confiabilidad para herramientas de corte aplicado al proceso de taladrado. En: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. Marzo, 2006. No. 36, p. 56-69.

REYES CORZO, Martha Sofía. Estudio experimental de la resistencia a la corrosión de un acero al carbono AISI SAE 1020 implantado con iones de titanio vía plasma. Trabajo de grado ingeniera metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2011. 113 p.

VALBUENA NIÑO, Ely Dannier, et al. Aplicación de descargas simultáneas de alto voltaje y arco eléctrico para el tratamiento superficial avanzado de metales. En: ITECKNE. Junio, 2012. Vol. 9. No. 1, p. 14-20.

VALBUENA NIÑO, Ely Dannier, et al. Estudio experimental de la resistencia a la corrosión de un acero al carbono AISI SAE 1020 implantado con iones de titanio. En: Rev. LatinAm. Metal. Mat. Abril, 2012, p. 138-146.

VALBUENA NIÑO, Ely Dannier, et al. Modificación superficial de un acero AISI SAE 1045 mediante la implantación de iones de nitrógeno y titanio. En: ITECKNE. Junio, 2011. Vol. 8. No. 1, p. 31-36.

VALBUENA NIÑO, Ely Dannier, et al. Estudio de características votio - ampéricas y peculiaridades de funcionamiento de un vaporizador de arco en vacío. En: Revista Colombiana de Física. Septiembre, 2011. Vol. 43. No. 2, p. 458-462.

VALBUENA NIÑO, Ely Dannier, et al. Caracterización de cupones gravimétricos de acero API 5LX 65 implantado por iones de nitrógeno e iones de titanio. En: Revista Colombiana de Física. Abril, 2011. Vol. 43. No. 1, p. 134-137.

## **ANEXOS**

ANEXO A. Tabla ANOVA para  $\alpha=0,05$ .

$F_{\alpha, n_1, n_2}$

$\nu_2$	$\nu_1$	Degrees of freedom for the numerator ( $\nu_1$ )																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3	
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25	
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	

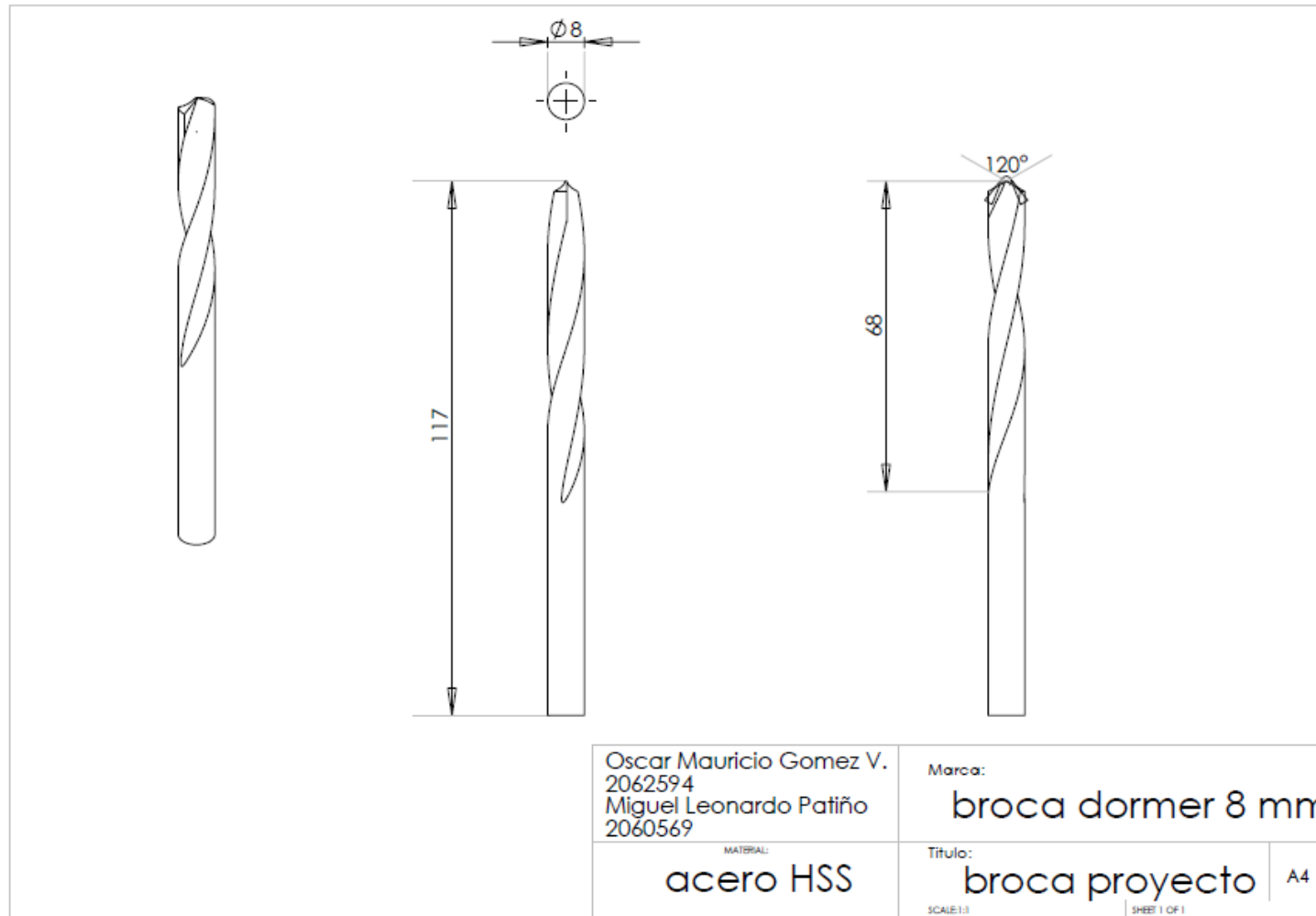
FUENTE: MONTGOMERY, Douglas C. y RUNGER, George C. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México: Limusa Wiley, 2008, pág. 659.

**ANEXO B. Tabla DUNCAN para  $\alpha=0,05$ .**

Grados de libertad del error	Tratamientos															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	
2	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	
3	4.501	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	
4	3.927	4.013	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	
5	3.635	3.749	3.797	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	
6	3.461	3.587	3.619	3.68	3.694	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	
7	3.344	3.477	3.548	3.588	3.611	3.622	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	
8	3.261	3.399	3.475	3.521	3.549	3.566	3.575	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	
9	3.199	3.339	3.42	3.47	3.502	3.523	3.536	3.544	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	
10	3.151	3.293	3.376	3.43	3.465	3.489	3.505	3.516	3.522	3.525	3.526	3.526	3.526	3.526	3.526	
11	3.113	3.256	3.342	3.397	3.435	3.462	3.48	3.493	3.501	3.506	3.509	3.51	3.51	3.51	3.51	
12	3.082	3.225	3.313	3.37	3.41	3.439	3.459	3.474	3.484	3.491	3.496	3.498	3.499	3.499	3.499	
13	3.055	3.2	3.259	3.348	3.389	3.419	3.442	3.458	3.47	3.478	3.484	3.488	3.49	3.49	3.49	
14	3.033	3.178	3.268	3.329	3.372	3.403	3.426	3.444	3.457	3.467	3.474	3.479	3.482	3.484	3.484	
15	3.014	3.16	3.25	3.312	3.356	3.389	3.413	3.432	3.446	3.457	3.465	3.471	3.476	3.478	3.48	
16	2.998	3.144	3.235	3.298	3.343	3.376	3.402	3.422	3.437	3.449	3.458	3.465	3.47	3.473	3.477	
17	2.984	3.13	3.222	3.285	3.331	3.366	3.392	3.412	3.429	3.441	3.451	3.459	3.465	3.469	3.473	
18	2.971	3.118	3.21	3.274	3.321	3.356	3.383	3.405	3.421	3.435	3.445	3.454	3.46	3.465	3.47	
19	2.96	3.107	3.199	3.264	3.311	3.347	3.375	3.397	3.415	3.429	3.44	3.449	3.456	3.462	3.467	
20	2.95	3.097	3.19	3.255	3.303	3.339	3.368	3.391	3.409	3.424	3.436	3.445	3.453	3.459	3.464	
24	2.919	3.066	3.16	3.226	3.276	3.315	3.345	3.37	3.39	3.406	3.42	3.432	3.441	3.449	3.456	
30	2.888	3.035	3.131	3.199	3.25	3.29	3.322	3.349	3.371	3.389	3.405	3.418	3.43	3.439	3.447	
40	2.858	3	3.102	3.171	3.224	3.266	3.3	3.328	3.352	3.373	3.39	3.405	3.418	3.429	3.439	
60	2.829	2.976	3.073	3.143	3.198	3.241	3.277	3.307	3.333	3.355	3.374	3.391	3.406	3.419	3.431	
120	2.8	2.947	3.045	3.116	3.172	3.217	3.254	3.287	3.314	3.337	3.359	3.377	3.394	3.409	3.423	
Inf	2.772	2.918	3.017	3.089	3.146	3.193	3.232	3.265	3.294	3.32	3.343	3.363	3.382	3.399	3.414	

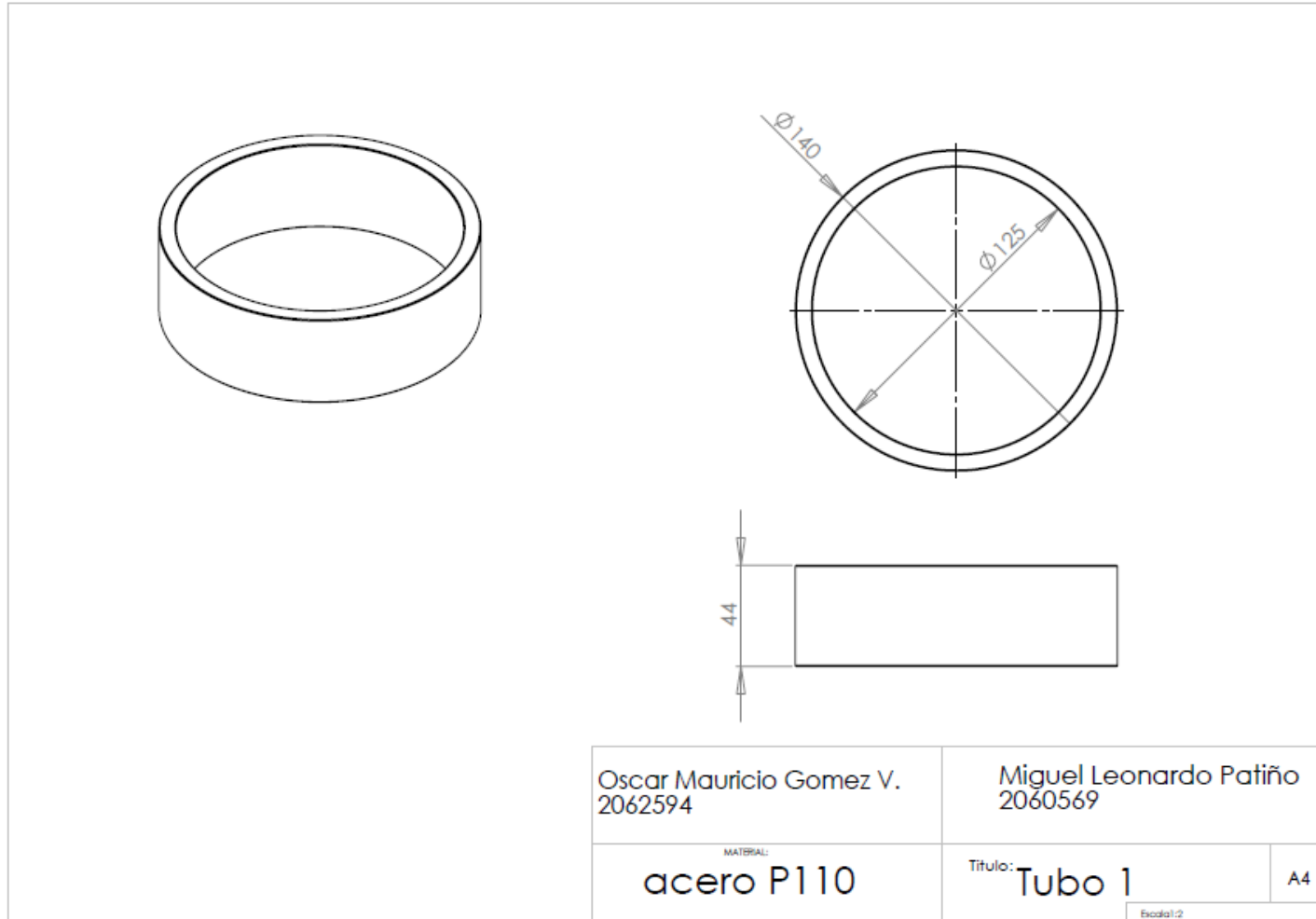
FUENTE: MONTGOMERY, Douglas C. y RUNGER, George C. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México: Limusa Wiley, 2008, pág. 654.

### ANEXO C. Plano broca DORMER.



Fuente: Autores.

**ANEXO D. Plano anillo de acero P110.**



Fuente: Autores.

## ANEXO E. Tablas Análisis Experimento Unifactorial Completamente Aleatorizado utilizando Excel.

**EXPERIMENTO UNIFACTORIAL COMPLETAMENTE ALEATORIZADO**

TRATAMIENTO SUPERFICIAL	DISTANCIA TALADRADA [m]			TOTAL	PROMEDIO
10 KeV ; 4 min Ti	1,98	2,068	1,892	5,94	1,98
10 KeV ; 8 min Ti	2,244	2,046	2,376	6,666	2,222
10 KeV ; 4 min TiN	2,31	2,596	2,464	7,37	2,45666667
10 KeV ; 8 min TiN	2,75	2,574	2,838	8,162	2,72066667
Sin Tratamiento	1,474	1,54	1,408	4,422	1,474
				32,56	2,17066667

**VARIABLE INDEPENDIENTE:** Tratamiento superficial aplicado a la brocas.

**VARIABLE DEPENDIENTE:** Distancia taladrada total de las brocas.

Número de Tratamientos	a	5
Número de observaciones por tratamiento	n	3

Fuente: Autores.

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Calibri 11 A A Ajustar texto General

Cortar Copiar Pegar Copiar formato Portapapeles Fuente Alineación Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Eliminar Formato Celdas Autosuma Rellenar Borrar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Modificar

H33

**ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)**

TRATAMIENTO SUPERFICIAL	DISTANCIA TALADRADA [m]			TOTAL	PROMEDIO
10 KV ; 4 min Ti	1,98	2,068	1,892	5,94	1,98
10 KV ; 8 min Ti	2,244	2,046	2,376	6,666	2,222
10 KV ; 4 min TiN	2,31	2,596	2,464	7,37	2,45666667
10 KV ; 8 min TiN	2,75	2,574	2,838	8,162	2,72066667
Sin Tratamiento	1,474	1,54	1,408	4,422	1,474
				32,56	2,17066667

Número de Tratamientos	a	5
Número de observaciones por tratamiento	n	3

FUENTE DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	$\sigma^2$	Fc	F <sub>T</sub>
Tratamientos	4	2,725888	0,681472	43,5463918	3,478
Error	10	0,156493333	0,01564933		
Total	14	2,882381333			

PRMEDIOS ANOVA DUNCAN TABLA DUNCAN

Listo 100%

Fuente: Autores.

**ANÁLISIS DE DUNCAN**

TRATAMIENTO SUPERFICIAL	DISTANCIA TALADRADA (m)			TOTAL	PROMEDIO
10 KV ; 4 min T1	1,98	2,068	1,892	5,94	1,98
10 KV ; 8 min T2	2,344	2,048	2,376	6,666	2,222
10 KV ; 4 min T3	2,31	2,596	2,464	7,37	2,45666667
10 KV ; 8 min T4	2,75	2,574	2,838	8,162	2,72066667
Sin Tratamiento	1,474	1,54	1,408	4,422	1,474
				32,56	2,17066667

Número de Tratamientos	a	5
Número de observaciones por tratamiento	n	3

Varianza del error [ $\sigma^2_{error}$ ]	0,01564933
Desviación del error [ $\sigma_{error}$ ]	0,07222496

PROMEDIOS	DIFERENCIA DE PROMEDIOS	VALOR DUNCAN	DUNCAN AJUSTADO	CONCLUSIÓN
T5 2,72066667	T5 - T1 1,24666667	3,43	0,2477316	T5>T1
T4 2,45666667	T5 - T2 0,74066667	3,376	0,24383146	T5>T2
T3 2,222	T5 - T3 0,43866667	3,293	0,23783678	T5>T3
T2 1,98	T3 - T4 0,264	3,151	0,22758084	T3>T4
T1 1,474	T4 - T1 0,98266667	3,376	0,24383146	T4>T1
	T4 - T2 0,47666667	3,293	0,23783678	T4>T2
	T4 - T3 0,23466667	3,151	0,22758084	T4>T3
	T3 - T1 0,748	3,293	0,23783678	T3>T1
	T3 - T2 0,242	3,151	0,22758084	T3>T2
	T2 - T1 0,506	3,151	0,22758084	T2>T1

Fuente: Autores.