ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

TALADRADO PROFUNDO EN PLACAS TUBULARES DE GENERADORES DE VAPOR NUCLEARES
(DEEP DRILLING IN TUBE SHEET OF NUCLEAR STEAM GENERATORS)

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Carlos González Bernal

Director: José Pedro Verón Guembe

2017

Índice general

1 Generadores de vapor nuclear 14

1.1 Introducción 14

1.1.1 Función del Generador de Vapor en las Centrales Nucleares . 15

1.2 Historia 16

1.3 Tipos de generadores 17

1.3.1 Generador de vapor horizontal 17

1.3.2 Generadores de vapor verticales 18

1.4 Descripción 20

1.5 Códigos y especificaciones 25

1.6 Componentes 26

1.6.1 Fondo esférico 27

1.6.2 Placa tubular y tubos en forma de U 27

1.6.3 TSP Tube Support Plate 28

1.6.4 Inyector del agua de alimentación y carcasa 32

1.6.5 Separadores, secadores y salida del generador de vapor 33

2 Placa tubular de generador de vapor nuclear 34

2.1 Introducción 34

2.2 Propiedades que deben tener los materiales de la placa tubular, para satisfacer las condiciones de servicio 35

2.2.1 Propiedades mecánicas 35

2.2.2 Soldabilidad 35

2.2.3 Maquinabilidad y forjabilidad 36

2.3 Estudio de tensiones 37

2.3.1 Cilindros de pared delgada bajo presión interna 37

2.3.2 Tensión circunferencial o radial 38

2.3.3 Tensión longitudinal 39

2.3.4 Esfera de pared delgada, sometida a presión interna 40

2.3.5 Cálculo del espesor de la placa tubular mediante normativa ASME Sección III 41

3 Taladrado profundo de la placa tubular 42

3.1 Introducción 42

3.2 Antecedentes históricos 44
3.3 Sistemas y métodos de taladrado 45
3.3.1 Sistema de broca cañón 45
3.3.2 Sistema Ejector 48
3.3.3 Sistema de un solo tubo BTA 50
3.3.4 Selección del sistema BTA para taladrar nuestra placa 52
3.4 Variantes dentro del sistema BTA 53
3.4.1 Taladrado enterizo 53
3.5 Herramienta a utilizar en nuestra placa tubular 54
3.6 Diseño de nuestra herramienta 57
4 Montaje de la herramienta y cálculo de los parámetros de corte 62
4.1 Datos de corte 63
4.2 Selección de la herramienta 64
4.3 Tubo de la herramienta 68
4.4 Sistema anti vibraciones 69
4.5 Fluido de corte 71
4.5.1 Conceptos y clasificación de los fluidos de corte 71
4.5.2 Objetivos del fluido de corte 73
4.5.3 Tipos de líquidos de corte 74
4.5.4 Selección de fluido de corte para el taladrado de la placa tubular 74
4.5.5 Cálculos de la capacidad y refrigeración requerida en el taladrado de la plata tubular 75
4.6 Máquina herramienta utilizada para el taladrado profundo de la placa tubular 77
4.7 Cálculo de los parámetros de corte 81
4.7.1 Parámetros de corte 81
4.7.2 Fuerzas de corte y potencia de corte 82
4.8 Disposición de los taladrados 84
4.9 Controles de calidad 85
4.9.1 Chaflanes/radios por el secundario 86

4.9.2 Diámetro de agujeros taladrados 86
4.9.3 Espesor de la placa tubo 86
4.9.4 Distancia entre ejes de agujeros en el lado primario 86
4.9.5 Examen visual de los agujeros 87
4.9.6 Perpendicularidad del agujero 87
4.10 Coste económico de la operación de mecanizado de la placa tubular 87
5 Control de la herramienta tras su vida de corte. Observación de la viruta. 89
5.1 Teoría del corte. Desgaste de la herramienta 89
5.2 Tipos de daños que puede sufrir la herramienta 90
5.2.1 Desgaste en flanco 90
5.2.2 Desgaste en cráter 91
5.2.3 Filo superpuesto 92
5.3 Control del daño en nuestra herramienta 93
5.3.1 Observación de los filos 93
5.3.2 Observación de su recubrimiento 103
5.3.3 Observación de la soldadura fuerte de las plaquitas a la broca 106
5.3.4 Observación del patín de la herramienta 111
5.3.5 Relación del daño observado en nuestra herramienta (filo superpuesto, Abrasión) 119
5.4 Control de la viruta. Su observación y análisis 125
5.4.1 Formación de la viruta 125
5.4.2 Rompevirutas 126
5.4.3 Influencia de la velocidad de corte y el avance 127
5.4.4 Estudio de nuestra viruta 128
5.5 Análisis de los restos de fluido de corte en la herramienta 142
6 Procesado posterior en los taladros de la placa tubular 149
6.1.1 Haz de tubos del generador de vapor nuclear 149
6.2 Unión de los tubos a la placa tubular 150
6.2.1 Soldadura de sello 153

6.3 Mecanismos de degradación de los tubos 153
6.3.1 Acumulación de lodos 153
6.3.2 Corrosión en resquicio 153
6.4 Reparación del tubo 154
7 Bibliografía 156

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1 GENERADOR DE VAPOR 16
ILUSTRACIÓN 2 FORJA DE LA CARCASA DE UN GENERADOR DE VAPOR 24
ILUSTRACIÓN 3 CÓDIGO ASME III SUBSECCIÓN NB 26
ILUSTRACIÓN 4 TSP (TUBE SUPPORT PLATES) PLACAS SOPORTE DE TUBOS 28
ILUSTRACIÓN 5 DETALLE DE LA GEOMETRÍA DE LA TSP DURANTE EL PROCESO DE INSERCIÓN. 29
ILUSTRACIÓN 6 ESCARIADOR. 30
ILUSTRACIÓN 7 PROCESO DE INSERCIÓN DE TUBOS EN LAS TSP. 30
ILUSTRACIÓN 8 DETALLE DE LA ZONA CURVA DE LOS TUBOS DURANTE EL PROCESO DE INSERCIÓN DE LOS MISMOS EN LAS TSP. 31
ILUSTRACIÓN 9 PLACA TUBULAR. 34
ILUSTRACIÓN 10 DIFERENTES HERRAMIENTAS PARA EL TALADRADO PROFUNDO. 42
ILUSTRACIÓN 11 HERRAMIENTA SISTEMA BTA TALADRADO PROFUNDO DE PLAQUITAS ATORNILLADAS. 43
ILUSTRACIÓN 12 CONJUNTO DE BROCAS DE TALADRADO SISTEMA BTA DE DIFERENTES DIÁMETROS DE CORTE Y PLAQUITAS. 44
ILUSTRACIÓN 13 SISTEMA DE TALADRADO BROCA CAÑÓN. 46
ILUSTRACIÓN 14 DETALLE DE BROCA CAÑÓN. 47
ILUSTRACIÓN 15 HERRAMIENTA SISTEMA BTA MONTADA EN MÁQUINA DE TALADRADO 51
ILUSTRACIÓN 16 PLAQUITA CENTRAL DE LA HERRAMIENTA. 55
ILUSTRACIÓN 17 PLAQUITA INTERMEDIA DE LA HERRAMIENTA. 55
ILUSTRACIÓN 18 PLAQUITA PERIFÉRICA DE LA HERRAMIENTA. 56
ILUSTRACIÓN 19 PATÍN DE LA HERRAMIENTA. 56
ILUSTRACIÓN 20 FOTO MEDIANTE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO DE LA PLAQUITA INTERMEDIA DE UNA BROCA BTA TRAS SU VIDA DE CORTE: OBSÉRVESE LA SOLDADURA FUERTE ALREDEDOR Y EL FILO ARRIBA. 57
ILUSTRACIÓN 21 HERRAMIENTA BTA DE PLAQUITAS SOLDADAS. 66
ILUSTRACIÓN 22 MAQUINARIA PARA MECANIZADOS DE TALADRADO PROFUNDO. 77
ILUSTRACIÓN 23 CABEZALES DE TALADRADO SISTEMA BTA. 78
ILUSTRACIÓN 24 POSICIONAMIENTO MEDIANTE PALPADOR. 78
ILUSTRACIÓN 25 DESGASTE DE FLANCO 90

ILUSTRACIÓN 26 DESGASTE DE CRÁTER 91
ILUSTRACIÓN 27 FILO SUPERPUESTO..... 92
ILUSTRACIÓN 29 FILOS DE LA HERRAMIENTA. DIÁMETRO DE LA BROCA 20 MM..... 94
ILUSTRACIÓN 30 FILOS CENTRAL E INTERMEDIO DE LA HERRAMIENTA MUESTRA..... 95
ILUSTRACIÓN 31 DETALLE DE LA ZONA DEL FILO DE LA HERRAMIENTA..... 96
ILUSTRACIÓN 32 DETALLE AL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO DE LA FRANJA DE DESGASTE (CARA DE INCIDENCIA) DE LA PLAQUITA PERIFÉRICA..... 97
ILUSTRACIÓN 33 FRANJA DE DESGASTE ANALIZADA DE LA PLAQUITA PERIFÉRICA. 98
ILUSTRACIÓN 34 FRANJA DE DESGASTE (CARA DE INCIDENCIA) DE LA PLAQUITA CENTRAL (MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO). OBSÉRVESE EL FILO SUPERPUESTO Y LA FRANJA DE DESGASTE, ASÍ COMO EL DAÑO POR ABRASIÓN..... 100
ILUSTRACIÓN 35 ZONA ANALIZADA EN LA FRANJA DE DESGASTE DE LA PLAQUITA CENTRAL..... 101
ILUSTRACIÓN 36 ZONA ANALIZADA DEL RECUBRIMIENTO DE LA PLAQUITA CENTRAL. 104
ILUSTRACIÓN 37 DETALLE AL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO DE LA SOLDADURA DE LAS PLAQUITAS DE METAL DURO A LA HERRAMIENTA (ZONA CENTRAL). 108
ILUSTRACIÓN 38 ZONA ANALIZADA DEL METAL DE LA SOLDADURA DE LA PLAQUITA CENTRAL..... 109
ILUSTRACIÓN 39 PATÍN DE LA HERRAMIENTA..... 111
ILUSTRACIÓN 40 DETALLE ZONA PATÍN EN LA HERRAMIENTA..... 112
ILUSTRACIÓN 41 DETALLE DE LA ZONA FRONTAL DEL PATÍN..... 114
ILUSTRACIÓN 42 DETALLE DEL BORDE SUPERIOR DEL PATÍN. NO SE OBSERVAN GRIETAS DE FATIGA TÉRMICA LO QUE INDICA QUE HA HABIDO UN BUEN CAUDAL Y PRESIÓN DEL ACEITE DE CORTE. 115
ILUSTRACIÓN 43 DETALLE AL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO DE LA ZONA DEL PATÍN DE LA HERRAMIENTA MECANIZADO POR RECTIFICADO. 116
ILUSTRACIÓN 44 ZONA DEL PATÍN ANALIZADA..... 117
ILUSTRACIÓN 45 DETALLE ZONA DEL PATÍN (DERECHA), MECANIZADA POR RECTIFICADO. 119
ILUSTRACIÓN 46 DETALLE AL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO DEL FILO (CARA DE INCIDENCIA) DONDE APARECE FILO. 120

ILUSTRACIÓN 47 ZONA DEL FILO DE LA HERRAMIENTA ANALIZADA. 121
ILUSTRACIÓN 48 ZONA DEL FILO ANALIZADA. FILO SUPERPUESTO. 123
ILUSTRACIÓN 49 VIRUTA DE LA OPERACIÓN DE TALADRADO BTA. 125
ILUSTRACIÓN 50 CARA DE LA VIRUTA POR LA QUE NO PASA EL FILO DE LA HERRAMIENTA. 128
ILUSTRACIÓN 51 SECCIÓN DE VIRUTA. ZONA POR DONDE NO HA PASADO DEL FILO DE LA HERRAMIENTA. 129
ILUSTRACIÓN 52 VIRUTA POR LA CARA POR LA QUE NO HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA. 130
ILUSTRACIÓN 53 ZONA DE LA VIRUTA (POR DONDE NO HA PASADO EL FILO) ANALIZADA. 131
ILUSTRACIÓN 54 DETALLE DE LA ZONA DE LA VIRUTA POR DONDE NO HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA 133
ILUSTRACIÓN 55 DETALLE ANALIZADO EN LA CARA DE LA VIRUTA POR DONDE NO HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA OBSERVADA A MAYOR AUMENTO. 134
ILUSTRACIÓN 56 CARA DE LA VIRUTA POR LA QUE PASA EL FILO DE LA HERRAMIENTA 135
ILUSTRACIÓN 57 ZONA DE LA VIRUTA POR DONDE HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA. 136
ILUSTRACIÓN 58 ZONA DE LA VIRUTA POR DONDE PASA EL FILO DE LA HERRAMIENTA A MAYORES AUMENTOS. 137
ILUSTRACIÓN 59 ZONA DE LA VIRUTA POR DONDE PASA EL FILO 138
ILUSTRACIÓN 60 ZONA DE LA VIRUTA POR DONDE HA PASADO EL FILO. 140
ILUSTRACIÓN 61 ZONA ESTUDIADA DE LA VIRUTA, POR LA CARA POR DONDE HA PASADO EL FILO. 141
ILUSTRACIÓN 62 COLOCACIÓN DE LOS TUBOS DE GENERADOR DE VAPOR. CIRCUITO PRIMARIO. 149
ILUSTRACIÓN 63 TUBOS DE GENERADOR DE VAPOR. CIRCUITO PRIMARIO. 150

Índice de figuras

FIGURA 1 ESQUEMA DE LOS CIRCUITOS EN UNA CENTRAL NUCLEAR DE AGUA A PRESIÓN. 15
FIGURA 2 GENERADOR DE VAPOR HORIZONTAL. 18

FIGURA 3 GENERADOR DE VAPOR VERTICAL. 20
FIGURA 4 DETALLE SECCIÓN GENERADOR DE VAPOR. 22
FIGURA 5 ESQUEMA DEL FLUJO DE AGUA POR EL INTERIOR DEL GENERADOR DE VAPOR. 23
FIGURA 6 BARRAS ANTI VIBRATORIAS 32
FIGURA 7 ESQUEMA DE TENSIONES RADIALES EN CILINDRO. 38
FIGURA 8 ESQUEMA DE TENSIONES LONGITUDINALES EN CILINDRO. 39
FIGURA 9 ESQUEMA DE TENSIONES EN ESFERA DE PARED DELGADA. 40
FIGURA 10 ESQUEMA DE PRESIONES Y ESPESOR DE LA PLACA TUBULAR. 41
FIGURA 11 ESQUEMA DEL CIRCUITO SEGUIDO POR EL FLUIDO DE CORTE Y LAS VIRUTAS EN EL SISTEMA DE TALADRADO BROCA CAÑÓN 48
FIGURA 12 SISTEMA EJECTOR. 49
FIGURA 13 ESQUEMA DEL CIRCUITO DE FLUIDO DE CORTE / VIRUTA EN EL SISTEMA EJECTOR. 49
FIGURA 14 SISTEMA DE UN SOLO TUBO BTA. 50
FIGURA 15 DIFERENTES COMPONENTES DEL MONTAJE DE LA HERRAMIENTA. 51
FIGURA 16 ESQUEMA DEL CIRCUITO QUE SIGUE DEL FLUIDO DE CORTE Y LA VIRUTA EN EL SISTEMA DE TALADRADO BTA. 52
FIGURA 17 ESQUEMA DEL MÉTODO DE MECANIZADO PROFUNDO POR TALADRADO ENTERIZO. 53
FIGURA 18 DETALLE PLAQUITAS SOLDADAS EN BROCA BTA. 54
FIGURA 19 ESQUEMA DE FUERZAS DIRIGIDAS AL PATÍN DE LA HERRAMIENTA. SUPERIOR BROCA TALADRO, INTERMEDIA BROCA CAÑÓN E INFERIOR SISTEMA BTA. 58
FIGURA 20 ÁNGULO DE PUNTA Y ÁNGULO DE POSICIÓN DE LA PLAQUITA DE LA PERIFERIA. 59
FIGURA 21 ÁNGULO DE INCIDENCIA. 59
FIGURA 22 ÁNGULO DE AVANCE, ÁNGULO DEL FILO Y ÁNGULO SUPERIOR. 60
FIGURA 23 RELACIÓN ENTRE EL EMPUJE Y EL ÁNGULO DE POSICIÓN KAPR. 60
FIGURA 24 RELACIÓN ENTRE EL EMPUJE Y EL AVANCE DE LA HERRAMIENTA. 61
FIGURA 25 ESQUEMA DE MONTAJE DE HERRAMIENTA BTA (INCLUYE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y RECOGIDA DE VIRUTAS). 62
FIGURA 26 ESQUEMA DE GEOMETRÍAS DE HERRAMIENTAS BTA SUMINISTRADAS POR EL PROVEEDOR. 67

FIGURA 27 GEOMETRÍA DE LOS TUBOS DE LA HERRAMIENTA. 68
FIGURA 28 DETALLE SISTEMA AMORTIGUADOR ANTI VIBRACIONES..... 70
FIGURA 29 SISTEMA ANTI VIBRACIÓN. ESQUEMAS DE GEOMETRÍAS..... 70
FIGURA 30 GRÁFICO RELACIÓN PRESIÓN-VOLUMEN DE FLUIDO DE CORTE..... 73
FIGURA 31 ESQUEMA DE MÁQUINA HERRAMIENTA UTILIZADA PARA EL TALADRADO PROFUNDO DE LA PLACA TUBULAR 80
FIGURA 32 PARÁMETROS DE CORTE PARA TALADRADO BTA..... 81
FIGURA 33 PROFUNDIDAD DE CORTE EN TALADRO ENTERIZO 82
FIGURA 34 ESQUEMA DE FUERZAS EN LA HERRAMIENTA. 83
FIGURA 35 TALADRADO DE PLACA TUBULAR. 85
FIGURA 36 ESQUEMA DEL MECANISMO DE CORTE DE LA HERRAMIENTA 89
FIGURA 37 MICROANÁLISIS POR RAYOS X (EDX) DE LA FRANJA DE DESGASTE DE LA PLAQUITA PERIFÉRICA. 98
FIGURA 38 GRÁFICO DE LOS RESULTADOS DE LA TABLA 10. 99
FIGURA 39 MICROANÁLISIS DE LA ILUSTRACIÓN 28 Y TABLA 11..... 101
FIGURA 40 MICROANÁLISIS DE LA ILUSTRACIÓN 28 Y TABLA 11..... 102
FIGURA 41 GRÁFICA CORRESPONDIENTE A LA TABLA 12. 103
FIGURA 42 ANÁLISIS EDAX DEL RECUBRIMIENTO DE LA PLAQUITA CENTRAL. 104
FIGURA 43 ANÁLISIS DEL RECUBRIMIENTO DE LA PLAQUITA CENTRAL..... 105
FIGURA 44 ESQUEMA DE RECUBRIMIENTO DE LAS PLAQUITAS DE LA HERRAMIENTA. . 106
FIGURA 45 GRÁFICO DE RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS POR RAYOS X DEL METAL DE SOLDADURA DE LA PLAQUITA CENTRAL. 110
FIGURA 46 DISTANCIA DE EQUILIBRADO DE ALINEACIÓN Y ESTABILIDAD PARA EL TALADRADO. 113
FIGURA 47 RESULTADO MICROANÁLISIS POR RAYOS X (EDX O EDS) EN LA ZONA DEL PATÍN DE LA HERRAMIENTA..... 117
FIGURA 48 GRÁFICO DE RESULTADOS DE MICROANÁLISIS POR RAYOS X (EDX O EDS) EN EL PATÍN DE LA HERRAMIENTA. 118
FIGURA 49 RESULTADO DEL MICROANÁLISIS EN LA ZONA SUPERIOR DEL FILO. 121
FIGURA 50 GRÁFICO DE RESULTADOS EN LA ZONA SUPERIOR DEL FILO DE LA HERRAMIENTA 122

FIGURA 51 RESULTADO DEL MICROANÁLISIS POR RAYOS X (EDX O EDS) EN LA ZONA DE FILO SUPERPUESTO. 123
FIGURA 52 GRÁFICO DE RESULTADOS A PARTIR DEL MICROANÁLISIS DE LA ZONA DE FILO SUPERPUESTO. 124
FIGURA 53 FORMACIÓN DE LAS VIRUTAS. 126
FIGURA 54 ESQUEMA DEL TIPO DE VIRUTA OBTENIDA DEPENDIENDO DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y EL AVANCE. 127
FIGURA 55 MICROANÁLISIS POR RAYOS X (EDX O EDS), CARA DE LA VIRUTA POR DONDE NO HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA. 131
FIGURA 56 GRÁFICO DE RESULTADOS DE MICROANÁLISIS POR RAYOS X (EDX O EDS) DE LA CARA DE LA VIRUTA POR DONDE NO HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA. 132
FIGURA 57 GRÁFICO DEL MICROANÁLISIS POR RX ANÁLISIS DEL DETALLE DE LA CARA DE LA VIRUTA POR DONDE NO HA PASADO EL FILO. 135
FIGURA 58 ESPECTRO DE LA ZONA ANALIZADA POR DONDE HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA EN LA VIRUTA. 138
FIGURA 59 GRÁFICO DE RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS EN LA CARA DE LA VIRUTA QUE HA SIDO MECANIZADA POR LA HERRAMIENTA 139
FIGURA 60 ESPECTRO OBTENIDO PARA LA ZONA ESTUDIADA DE LA VIRUTA (POR DONDE HA PASADO EL FILO). 141
FIGURA 61 GRÁFICO DE RESULTADOS DEL ESPECTRO EN LA CARA DE LA VIRUTA QUE HA SIDO MECANIZADA POR LA HERRAMIENTA. 142
FIGURA 62 ZONA DE LA PLAQUITA CENTRAL CON RESTO DE FLUIDO DE CORTE..... 143
FIGURA 63 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MICROANÁLISIS 143
FIGURA 64 GRAFICO DE RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS 144
FIGURA 65 ZONA DEL FILO EN LA PLAQUITA CENTRAL 145
FIGURA 66 ZONA CERCANA AL FILO HA ANALIZAR LA ADHESIÓN DE FLUIDO DE CORTE146
FIGURA 67 RESULTADO DE MICROANÁLISIS POR RAYOS X (EDX O EDS) ZONA CERCANA AL FILO DE LA HERRAMIENTA 146
FIGURA 68 TABLA DE RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS, ZONA CERCANA AL FILO DE LA HERRAMIENTA 147

FIGURA 69 GRÁFICO DE RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS EN UNA ZONA CERCANA AL FILO DE LA HERRAMIENTA 147
FIGURA 70 PROCESO DE EXPANSIONADO DE LOS TUBOS. 152
FIGURA 71 DETALLE HUECO ENTRE PLACA TUBULAR Y TUBO, DESPUÉS DEL EXPANSIONADO..... 154

Índice de tablas

TABLA 1 TABLA DE DUREZAS Y CALIDADES DE LAS PLAQUITAS DE LA HERRAMIENTA Y LOS RESPECTIVOS ROMPE VIRUTAS..... 61
TABLA 2 TABLA DE DATOS DE CORTE PARA LA HERRAMIENTA PROPORCIONADA POR EL FABRICANTE..... 63
TABLA 3 TABLA DEL SUMINISTRADOR DE BROCAS SISTEMAS BTA Y EJECTOR..... 65
TABLA 4 TABLA DE GEOMETRÍAS DE HERRAMIENTAS BTA SUMINISTRADAS POR EL PROVEEDOR. 67
TABLA 5 PRINCIPALES GEOMETRÍAS DE LA HERRAMIENTA SELECCIONADA PARA EL MECANIZADO DE LA PLACA TUBULAR. 68
TABLA 6 TABLA DE GEOMETRÍA DE TUBOS DEL PROVEEDOR..... 68
TABLA 7 PRINCIPALES GEOMETRÍAS DEL TUBO SELECCIONADO..... 69
TABLA 8 GEOMETRÍAS DE SISTEMAS ANTI VIBRACIÓN DEL FABRICANTE..... 71
TABLA 9 PRINCIPALES GEOMETRÍAS DEL SISTEMA ANTI VIBRACIÓN SELECCIONADO. ... 71
TABLA 10 MICROANÁLISIS DE LA FRANJA DE DESGASTE EN LA PLAQUITA PERIFÉRICA. . 99
TABLA 11 MICROANÁLISIS DE LA FRANJA DE DESGASTE DE LA PLAQUITA CENTRAL. .. 102
TABLA 12 COMPOSICIÓN INTRÍNSECA DEL FILO DE LA PLAQUITA CENTRAL (CONSIDÉRESE QUE EL ANÁLISIS EDAX NO CUANTIFICA EL CARBONO). 103
TABLA 13 TABLA DE RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS DE LA PLAQUITA CENTRAL.... 105
TABLA 14 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MICROANÁLISIS DEL METAL DE LA SOLDADURA DE LAS PLAQUITAS A LA HERRAMIENTA. 109
TABLA 15 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MICROANÁLISIS DEL PATÍN DE LA HERRAMIENTA 118
TABLA 16 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MICROANÁLISIS DE LA ZONA SUPERIOR DEL FILO..... 122
TABLA 17 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MICROANÁLISIS DE LA ZONA DE FILO SUPERPUESTO. 124

TABLA 18 RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS DE LA ZONA POR DONDE NO HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA. 132
TABLA 19 RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS A UN MAYOR NÚMERO DE AUMENTOS EN LA CARA DE LA VIRUTA POR DONDE NO HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA. ... 134
TABLA 20 RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS EN ZONA DE LA VIRUTA POR DONDE HA PASADO EL FILO DE LA HERRAMIENTA. 139
TABLA 21 RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS EN LA CARA DE LA VIRUTA QUE HA SIDO MECANIZADA POR LA HERRAMIENTA. 142
TABLA 22 RESULTADOS DEL MICROANÁLISIS. 144

1 Generadores de vapor nuclear

1.1 Introducción

El mundo actual presenta una gran dependencia del consumo de energía eléctrica y ha estructurado su desarrollo sobre la misma base.

Para satisfacer la alta demanda energética, el hombre ha creado según sus necesidades varios tipos de centrales generadoras de energía eléctrica tales como: termoeléctricas, plantas renovables y centrales nucleares, en dependencia del combustible utilizado en ellas; así como del equipamiento de las mismas.

A mediados de la década de los años 50 surgen las centrales nucleares.

Éstas utilizan como combustible fundamental el Uranio enriquecido 235.

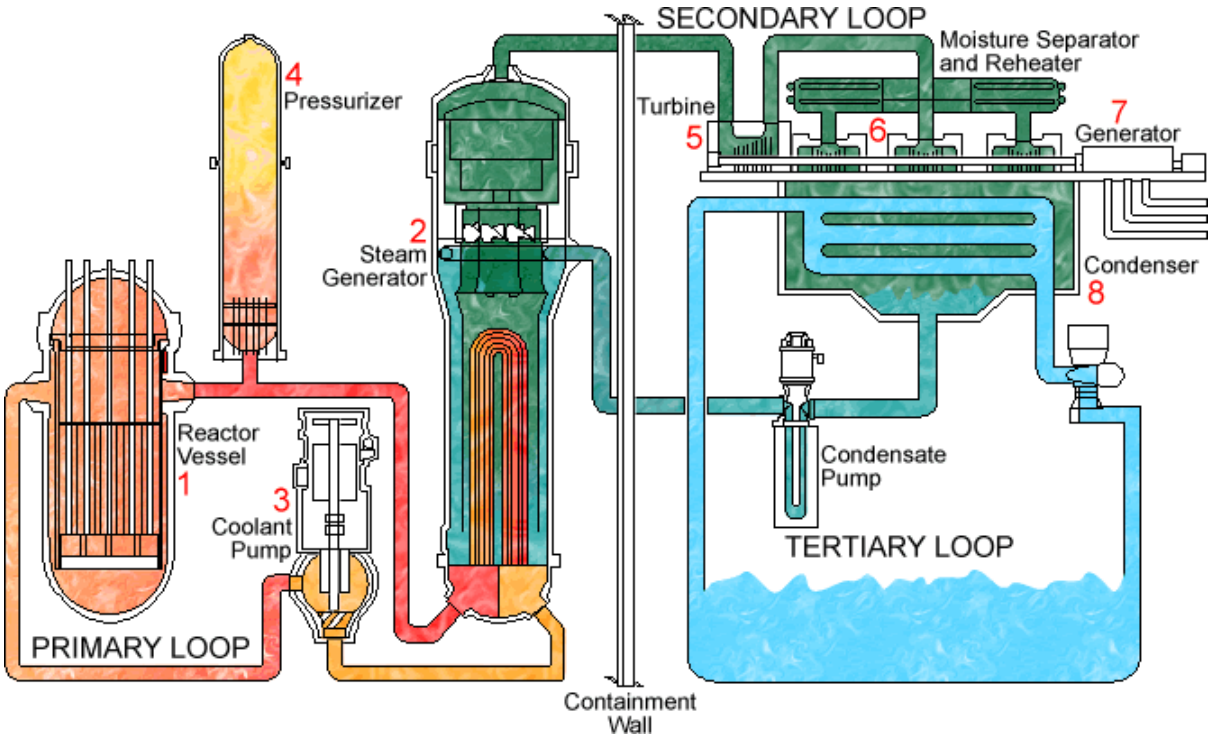
El reactor, la turbina, el generador eléctrico, el condensador, las bombas y el generador de vapor son los elementos que forman su equipamiento básico.

En las centrales nucleares de agua a presión, se utilizan intercambiadores de calor llamados generadores de vapor, para transformar la energía calorífica que produce el núcleo, en vapor a alta presión que se usa en las turbinas para producir energía eléctrica.

A la hora de diseñar un generador de vapor para una central nuclear, la cantidad de calor a transferir vendrá marcada por la potencia del reactor y el caudal de vapor por el diseño de las turbinas, reduciendo los grados de libertad del diseño y complicando la determinación del diseño adecuado.

1.1.1 Función del Generador de Vapor en las Centrales Nucleares

Figura 1 Esquema de los circuitos en una central nuclear de agua a presión.



Fuente: www.eskom.co.za.

Nos centraremos en las centrales nucleares de tipo PWR (Pressurized Water Reactor), reactor de agua a presión, se trata de un reactor nuclear que usa agua como refrigerante y moderador de neutrones.

En el reactor de la central nuclear ocurre la fisión nuclear del combustible, el refrigerante es el encargado de absorber la energía calorífica producida y llevar ésta hasta el generador de vapor. En el generador de vapor para el caso de una central nuclear de dos o de tres circuitos, el refrigerante cede su calor al agua de segundo circuito, convirtiéndola en vapor. Después que el vapor realiza su trabajo en la turbina cae en el condensador, donde se enfría con ayuda del sistema de enfriamiento, transformándose de nuevo en agua líquida que es bombeada al generador de vapor.

Otra función que presenta (para el caso de las centrales nuclear de dos o tres circuitos) el generador de vapor es, el control de la radioactividad

producida en el primer circuito; es decir permite que el agua, el vapor, las tuberías y equipos que componen el segundo circuito sean completamente limpios, por tanto, es el componente que sirve de interfase entre los sistemas de refrigeración primario y secundario y constituye además una de las barreras físicas al escape de los productos de fisión al exterior.

Ilustración 1 Generador de vapor

Fuente: www.gettyimages.es

1.2 Historia

El generador de vapor de potencia nuclear comenzó como una planta de energía para el primer submarino nuclear, el USS Nautilus (SSN-571), fue diseñado y construido por la empresa de energía de Westinghouse, a partir de ahí la empresa comenzó su desarrollo e investigación de generadores de vapor de potencia nuclear.

El primer generador nuclear comenzó a funcionar en Obninsk, en la desaparecida Unión Soviética, en la primera central nuclear del mundo, el 27 de junio de 1954.

La humanidad, hasta ese momento, solo asociaba la energía nuclear como un medio de destrucción. Ésta central nuclear generaba 5Mw de potencia eléctrica y demostró la posibilidad técnica real de la utilización de la energía nuclear con fines pacíficos.

Hacia el final de la Guerra Fría la tendencia era la de fabricar generadores de vapor verticales (Occidente) y horizontales (Unión Soviética).

Westinghouse construyó una de las primeras plantas de energía nuclear, la central nuclear de Yankee Rowe, que utilizaba un generador de vapor de potencia nuclear, en 1960. Esta planta tenía una salida de 100 MW (mega vatios eléctricos). En comparación, algunas plantas modernas tienen más de 1300 MW salida.

Finalmente, otras empresas internacionales como Babcock & Wilcox y Combustion Engineering comenzaron sus propios programas de investigación y desarrollo de generadores de vapor.

1.3 Tipos de generadores

1.3.1 Generador de vapor horizontal

Se basa, en la absorción del calor del refrigerante primario, por la sustancia de trabajo del segundo circuito, el colector de entrada es la puerta del refrigerante al generador de vapor; una vez dentro, se distribuye por la superficie de transferencia.

Esta superficie forma paquetes de tubos los cuales permiten obtener canales verticales entre ellos, que ayudan al movimiento de la sustancia de trabajo durante su calentamiento. El refrigerante sale posteriormente por el colector de salida hacia el reactor nuevamente.

Esa agua alcanza la temperatura de ebullición y empleará el calor a partir de ese momento para la formación de vapor en una mezcla agua-vapor. La mezcla de menor densidad asciende por el enrejado que forma el haz de tubos, mientras que por los canales verticales desciende el agua de mayor densidad.

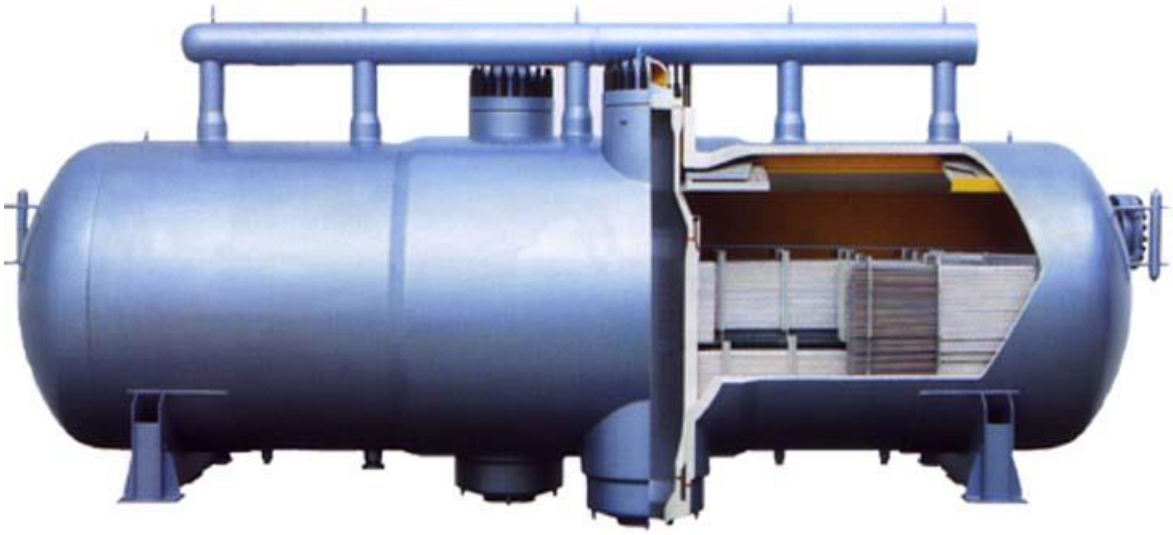
De la mezcla que asciende, la parte correspondiente a la fase líquida descenderá y la parte correspondiente a la fase vapor ascenderá separándose en lo que se llamará superficie de evaporación.

En los generadores de vapor horizontal se produce vapor, con un contenido de humedad que será reducido por las instalaciones de secado las cuales se encuentran situadas dentro del propio equipo. Este generador presenta un esquema muy sencillo para el proceso de secado.

En la parte inferior del generador de vapor existen unas tubuladuras cuya función es la extracción del agua con un alto contenido de sales, o sea, impurezas, las cuales se introducen con el agua de alimentación.

Aunque ésta es una versión útil debido a las ventajas que nos brinda y una de las mas utilizadas, presenta la desventaja de que la potencia unitaria no se puede aumentar a no ser que el tamaño del edificio se aumente.

Figura 2 Generador de vapor horizontal.



Fuente: www.nucleartourist.com.

1.3.2 Generadores de vapor verticales

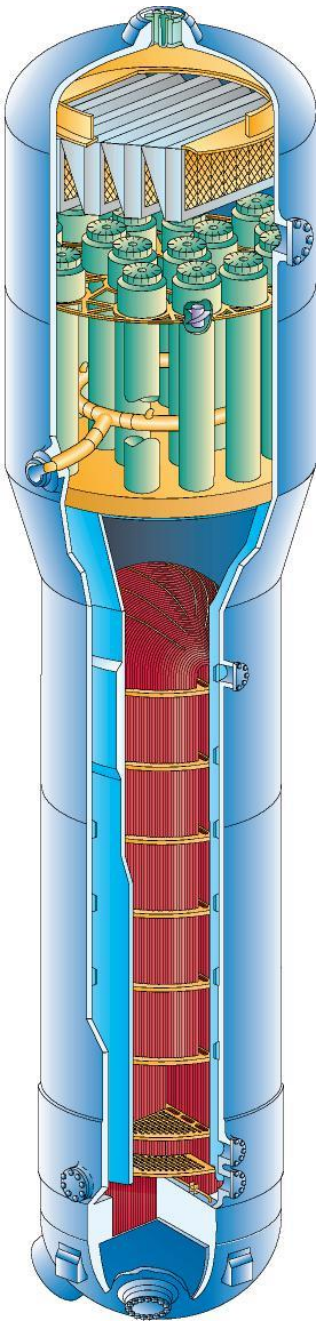
Estos generadores también están formados por un solo elemento donde se produce el vapor y se efectúa la separación de la humedad. En este caso también estamos en presencia de un sistema con circulación natural.

Como la presión estática en la parte inferior es mayor que la correspondiente a la temperatura de saturación, el agua ahí se encontrara subenfriada, por lo que instantáneamente no se producirá la ebullición de la misma; Deberá realizar cierto recorrido antes de comenzar la ebullición.

El área de evaporación o zona interfase aquí es menor, comparado con un generador de vapor horizontal de igual potencia, la velocidad de ascenso del vapor es más grande, lo que complica, notablemente el proceso de secado para lograr un grado de humedad permisible. Esta es una de las dificultades de este equipo. Además, en caso de parada, no ocurre circulación natural a diferencia del horizontal para extraer el calor residual del reactor. Se decantan barros en la evaporación que provocan sedimento en el fondo del generador.

Sin embargo estos generadores permiten un aumento considerable de la potencia unitaria mediante el aumento de la altura, el área que ocupa es pequeña lo que hace que se haya extendido su uso en la actualidad.

Figura 3 Generador de Vapor vertical.



Fuente: https://www.westinghousenuclear.com.

1.4 Descripción

El generador de vapor se sitúa entre la vasija y la bomba, Figura 1. Desde el punto de vista técnico, es un intercambiador de calor de una carcasa con dos pasos de tubos.

El generador es un evaporador de carcasa vertical y tubos en forma de U invertida, que tiene en su parte superior un equipo integrado de

separación de humedad y secado del vapor. El agua del primario circula por el interior de los tubos, entrando y saliendo a través de toberas situadas en un distribuidor semiesférico localizado en la parte inferior del generador de vapor.

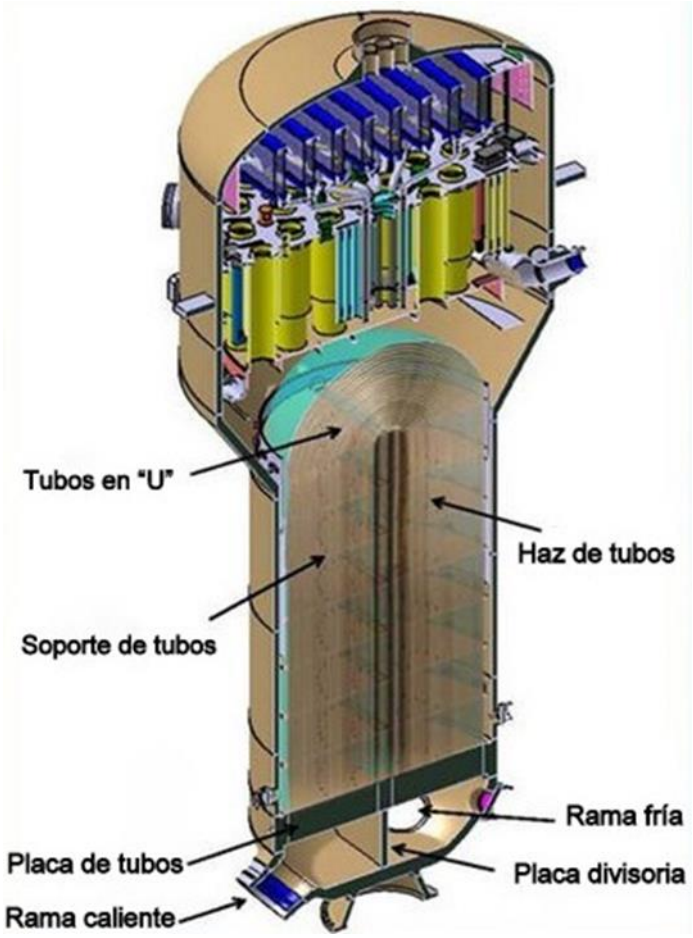
Este distribuidor está dividido por una placa vertical que separa las cámaras de entrada y salida. Está previsto también el acceso de personas a través de un paso de hombre a ambos lados de la cámara dividida. El vapor se genera en el exterior de los tubos en U invertida y fluye hacia arriba a través de los separadores de humedad y secadores, hacia la tobera de salida, situada en la parte superior.

Puede tener 20 metros de altura y de 3 a 5 metros de diámetro, con un peso en vacío aproximado de 415 toneladas. Contiene varios miles de tubos (entre 4.000 y 5.500) de paredes delgadas (1,2 milímetros de espesor) dentro de una carcasa de acero. Estos tubos separan el circuito de agua primario del secundario.

Por la gran longitud de los tubos, se sitúan en determinados lugares placas soporte, para limitar la vibración de los tubos, denominadas TSP (Tube Support Plate).

Los tubos son de aleaciones de níquel y las superficies mojadas por el refrigerante primario de la placa tubular y toberas correspondientes están recubiertas de un plaqueado de acero inoxidable austenítico y en algún caso de aleación de níquel.

Figura 4 Detalle sección generador de vapor.

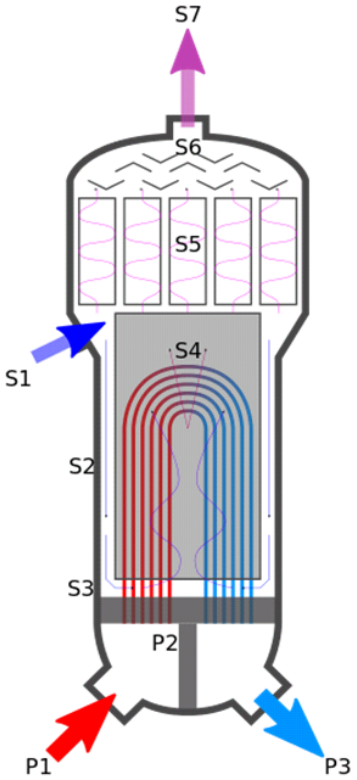


Fuente: nuclearstreet.com.

El refrigerante primario pasa por el interior de los tubos del generador de vapor enfriándose: entra a una temperatura aproximada de 330ºC (rama caliente) y sale a 290ºC (rama fría) a una presión cercana a los 180 bares. El agua de refrigeración (secundario) entra en la carcasa circundante del lado secundario absorbiendo el calor del circuito primario y convirtiéndose en vapor en torno a 180ºC y 80 bares de presión.

El vapor generado, antes de abandonar el generador, atraviesa un separador de humedad centrífugo y un secador que reduce la humedad, aumentando por consiguiente la calidad del vapor hasta valores de aproximadamente el 99,75 %, recirculando el agua condensada a través del anillo formado por la carcasa y la envoltura del haz de tubos. En la siguiente figura podemos observar un esquema del circuito del agua en generador de vapor.

Figura 5 Esquema del flujo de agua por el interior del generador de vapor.



P1: lazo primario, entrada caliente (del reactor)
P2: lazo principal, entrada a tubos en U
P3: lazo primario, salida fría (reactor)

S1: lazo secundario, agua de alimentación (de las bombas de agua de alimentación)
S2: lazo secundario, anillo de bajante de aguas
S3: lazo secundario, bajante de aguas de entrada a tubos
S4: lazo secundario, flujo sobre el haz de tubos
S5: lazo secundario, flujo a través del separador de humedad (paletas de remolino)
S6: lazo secundario, flujo a través del separador de humedad
S7: secundaria lazo, vapor a presión hacia fuera (a turbina de vapor)

Fuente:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Generic_Nuclear_PWR_Steam_Generator.svg.

Los generadores deben disponer de una gran superficie de contacto para realizar una transferencia de calor eficaz. Al trabajar en condiciones químicas y térmicas muy severas deben disponer de un eficaz programa de mantenimiento para garantizar la integridad de sus componentes.

El vapor sale de la tobera de vapor y continúa hacia la turbina de vapor. Por la tobera de alimentación (S1) entra el agua para compensar la masa que se evapora y sale del generador.

Ilustración 2 Forja de la carcasa de un generador de vapor

Fuente: www.gettyimages.es.

El principal problema que han presentado los generadores de vapor es la degradación de los tubos. Los diferentes mecanismos de degradación que han afectado a los tubos del generador han sido:

- Corrosión bajo tensión en la cara del primario.
- Corrosión bajo tensión en el diámetro exterior.
- Ataque intergranular.
- Picaduras.
- Desgaste por rozamiento.
- Estrangulamiento.
- Pérdida de espesor.
- Fatiga de alto ciclo.

El grado de degradación de los tubos es distinto dependiendo del material de los mismos, de la química y del diseño del generador.

En España esta degradación ha afectado de forma muy importante a las centrales de segunda generación (Ascó y Almaraz) y obligó a la sustitución de sus generadores.

Las medidas preventivas que se adoptan afectan principalmente a la química del agua del circuito secundario (se añade hidrazina, para controlar el pH del agua, que en condiciones óptimas deberá ser de 9 aproximadamente). Esto provoca que el impacto de ciertos defectos sea menor.

Las inspecciones que se realizan en cada parada de recarga deben caracterizar el defecto y con un criterio específico para el tipo de degradación y localización, valorar la integridad del tubo y si puede continuar en servicio o no. En caso de que los indicios obliguen a realizar una reparación, se dispone de dos soluciones: enmanguitar o taponar.

El progresivo taponamiento de los tubos del generador disminuye su eficiencia térmica y al agotar el margen de diseño del que disponen obliga a una disminución de potencia.

El taponamiento también afecta a la seguridad de la planta y a su rentabilidad, por lo que en ocasiones se opta por sustituir los generadores de vapor. Los nuevos generadores se fabrican con materiales que la experiencia ha demostrado que resisten mejor la degradación.

1.5 Códigos y especificaciones

La construcción de un generador de vapor nuclear se hace de acuerdo con un código que constituye una ley (ASME en EEUU, RCC-M en Francia, KTA en Alemania, etc…).

El código más usado a nivel mundial es el código ASME (American Society of Mechanical Engineer) en concreto la "Section III NB of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code", que asegura un diseño adecuado al servicio en base a la experiencia acumulada en la industria, ya sea en el diseño, fabricación, examen, ensayo y mantenimiento en servicio.

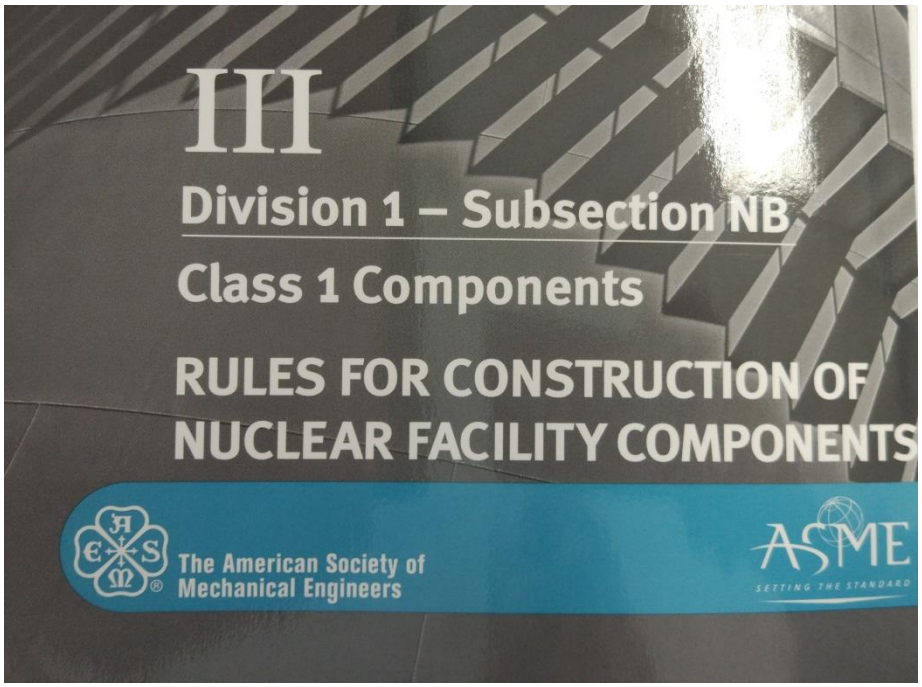
El artículo NB-4000 de la Sección III del Código ASME se centra en el proceso de fabricación del generador de vapor. Los materiales a usar están contenidos en la sección II del citado código, los exámenes no destructivos en su sección V.

Los diseñadores necesitan transmitir al fabricante una información concreta del diseño que no aborda el código ASME. Debido a eso el pedido que recibe el fabricante está basado fundamentalmente en la Especificación de Equipo y en los planos.

La Especificación de Equipo señalará que edición del código ASME aplica. Ésta edición habrá sido seguida fielmente durante el diseño y el fabricante la cumplirá estrictamente ya que como hemos señalado antes constituye una ley.

En base a toda esta información el fabricante edita sus propios planos y especificaciones para la construcción del generador de vapor.

Ilustración 3 Código ASME III Subsección NB



Fuente: Elaboración propia

1.6 Componentes

A continuación, se describe brevemente las piezas más importantes que forman parte de un generador de vapor estándar de una central de agua a presión.

1.6.1 Fondo esférico

El fondo esférico es el lugar donde se insertan la rama fría y la rama caliente del circuito primario, separadas por una placa de acero inoxidable austenítico. Se sitúa debajo de la placa tubular y tiene forma semiesférica.

Paso de hombre

Cuando se requiere tener acceso al interior, normalmente para realizar tareas de mantenimiento, el fondo esférico dispone de unas tubuladuras para este fin denominadas paso de hombre.

1.6.2 Placa tubular y tubos en forma de U

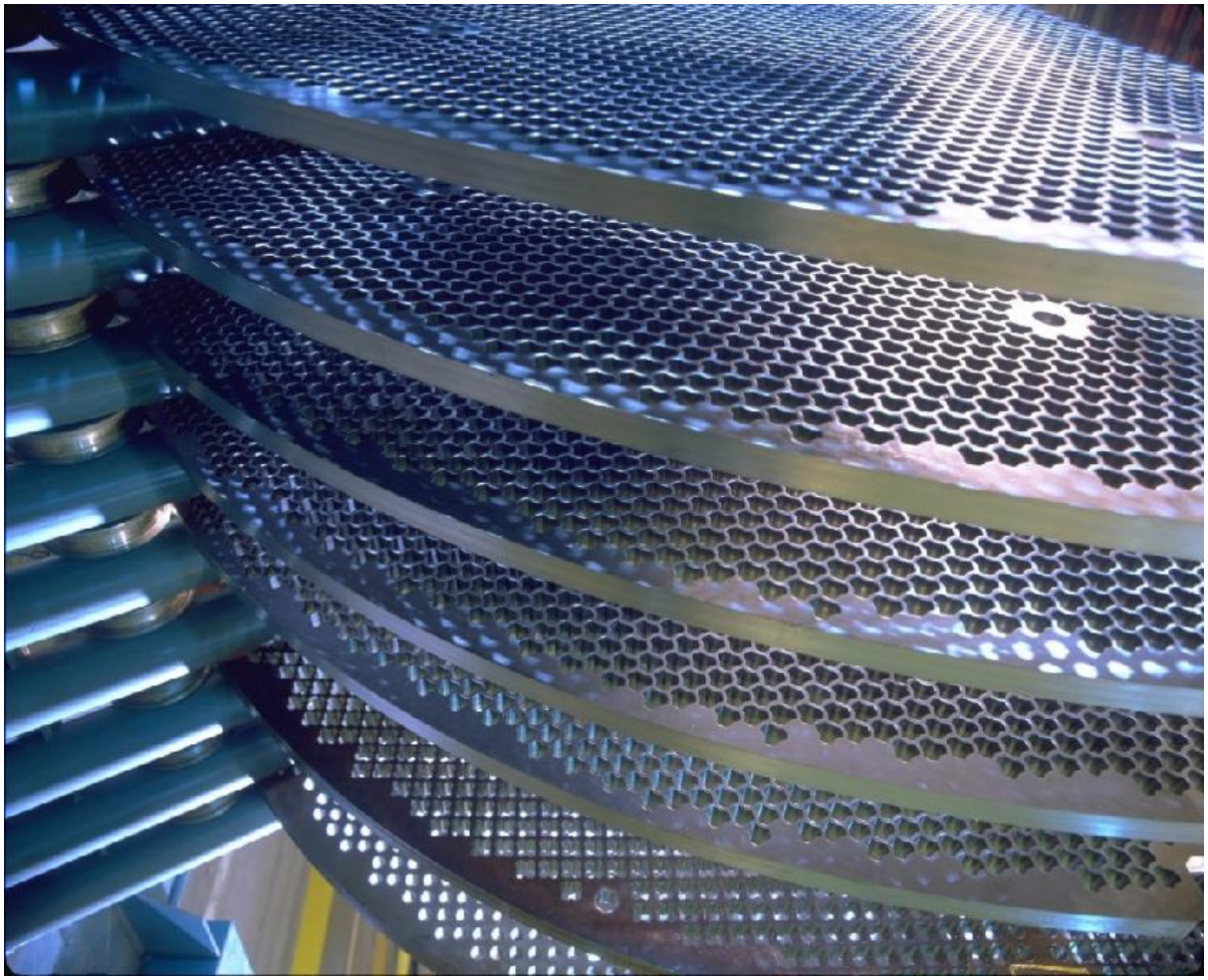
La placa tubular separa el lado primario del secundario del generador de vapor, tiene un espesor de medio metro aproximadamente y lleva taladrados los agujeros en los que se alojan los tubos del generador.

En el apartado 2 describiremos más en profundidad de la placa tubular.

Los tubos del generador son de una aleación de níquel (para garantizar una buena soldadura con la placa tubular, puesto que el plaqueado de la misma es una aleación de níquel similar), y cada generador tiene entre 4000 y 5500 tubos. En el último apartado el 6, describiremos los tubos, la unión de los mismos con la placa tubular, los principales mecanismos de degradación y las posibles opciones para resolver esos problemas de degradación.

1.6.3 TSP Tube Support Plate

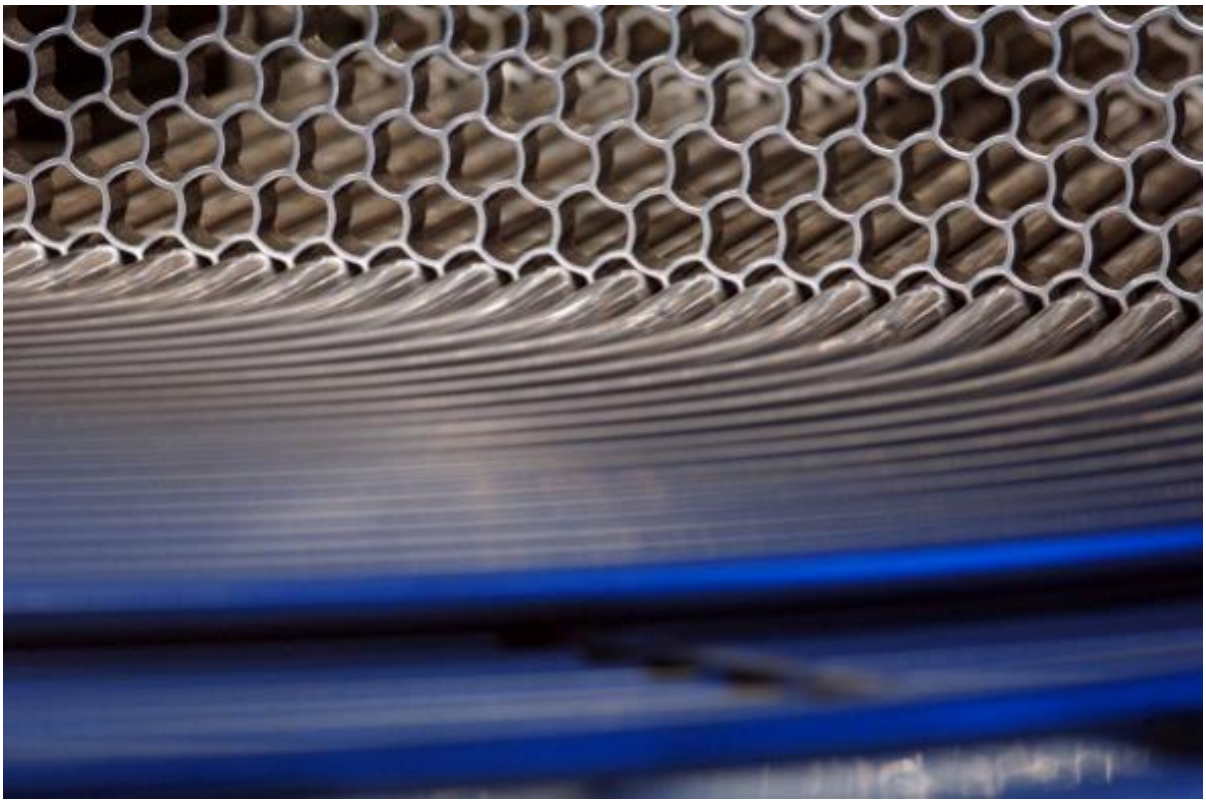
Ilustración 4 TSP (Tube Support Plate) Placas soporte de tubos.



Fuente: www.atomicpowerreview.blogspot.com.es.

TSP (Acrónimo de Tube Support Plate) es una placa perforada y brochada de acero inoxidable cuya función es dar soporte estructural al haz de tubos del circuito primario, en la siguiente ilustración puede verse que los agujeros adoptan una geometría de tipo trifolio.

Ilustración 5 Detalle de la geometría de la TSP durante el proceso de inserción.



Fuente: www.gettyimages.es.

Uno de los motivos por los cuales se adopta este tipo de diseños es para asegurar un buen paso de agua entre los agujeros brochados eliminando la posible corrosión, ya que de los componentes más dañados en el aspecto de la corrosión ejercida por el agua, es precisamente la TSP la más afectada.

Las perforaciones en la TSP se realizan por medio de una broca y un escariador.

Después con la brocha, utilizando fluido de corte, conseguimos un dimensionado muy preciso.

Ilustración 6 Escariador.

Fuente: http://www.cuttingtools.es.

Un mínimo error en una de sus dimensiones hace que cualquiera de los ligamentos mínimos se vea afectado, por lo que la automatización se ha implantado en su proceso de fabricación, reduciendo así el error al mínimo.

Ilustración 7 Proceso de inserción de tubos en las TSP.

Fuente: www.gettyimages.es.

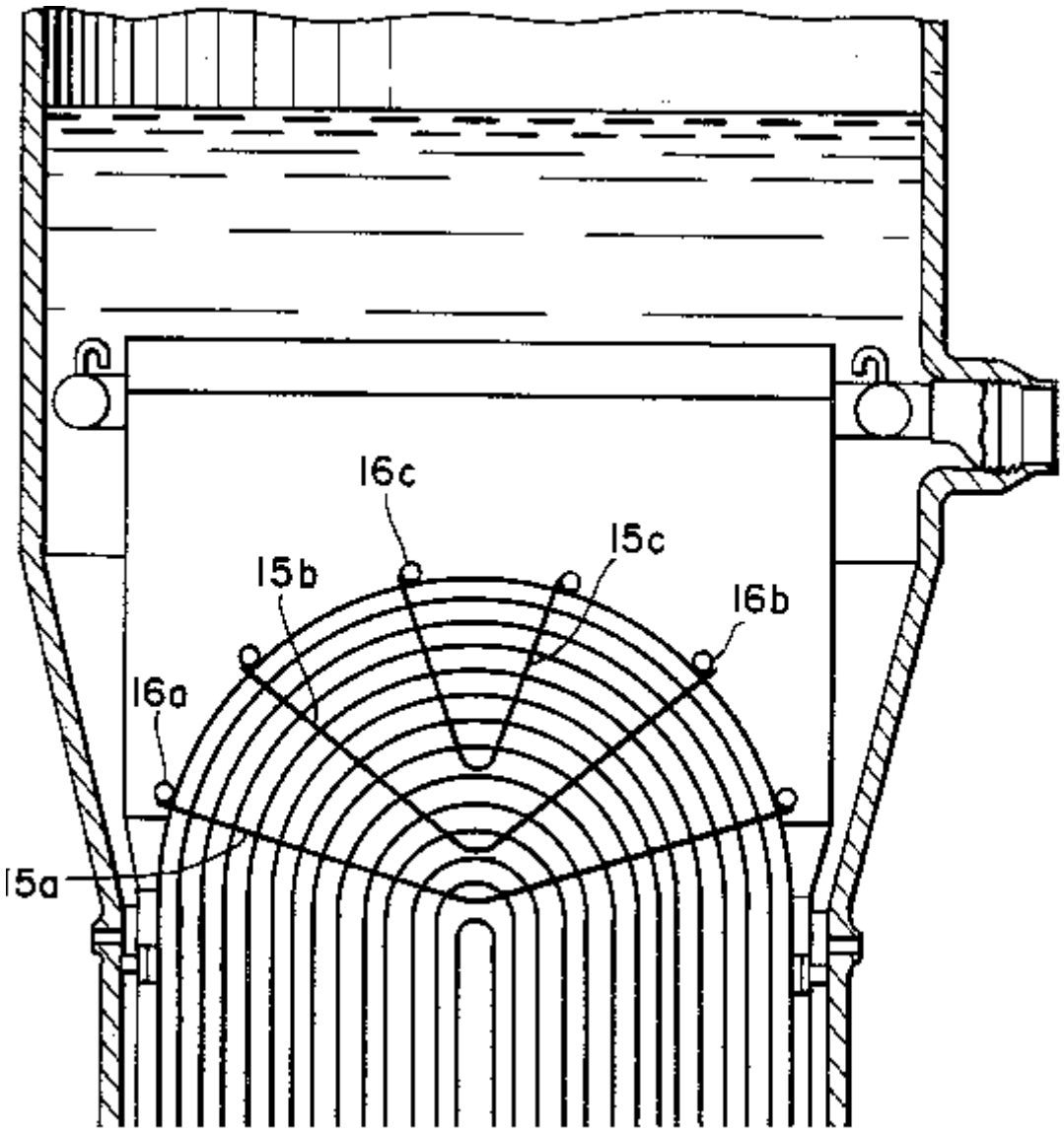
Ilustración 8 Detalle de la zona curva de los tubos durante el proceso de inserción de los mismos en las TSP.

Fuente: www.gettyimages.es.

Las barras o placas anti vibratorias se utilizan en las regiones curvas de los tubos para limitar de las amplitudes de vibración y proporcionan soporte a los tubos.

En la siguiente imagen se muestra su posición.

Figura 6 Barras anti vibratorias



Fuente: www.freepatentsonline.com.

1.6.4 Inyector del agua de alimentación y carcasa

La inserción del agua de alimentación en el secundario del generador de vapor se realiza en la parte superior del mismo, a través de un anillo con tubos en forma de J, para minimizar el golpe de ariete que se puede producir al inyectar agua de alimentación si el anillo se ha vaciado previamente por disminución de nivel en el generador de vapor o durante operaciones de limpieza en el generador.

1.6.5 Separadores, secadores y salida del generador de vapor

La parte de separadores se suele dividir en dos etapas:

- La primera etapa de la separación de la humedad está formada por deflectores ciclónicos instalados en la parte superior de la camisa.
- La segunda etapa consiste en un conjunto de secadores.
- La tobera de salida de vapor contiene un limitador de flujo tipo Venturi que reduce el flujo en caso de un accidente o rotura de la línea de vapor.
- La calidad del vapor extraído es del 99,9 %; el arrastre máximo de humedad es de 0,1% a la salida del limitador de caudal de vapor.

2 Placa tubular de generador de vapor nuclear

2.1 Introducción

La placa tubular separa el lado primario del secundario del generador de vapor, tiene un espesor de medio metro aproximadamente y lleva taladrados los agujeros en los que se alojaran los tubos del generador.

Ilustración 9 Placa tubular.

Fuente: www.dongjinfitting.en.ec21.com.

La placa de los generadores de vapor está fabricada en acero de baja aleación, como el ASME II Parte A SA-508 Grado 3 Clase2.

Esta placa en su lado primario tiene normalmente un plaqueado multicapa de una aleación de Níquel.

2.2 Propiedades que deben tener los materiales de la placa tubular, para satisfacer las condiciones de servicio

2.2.1 Propiedades mecánicas

Al considerar las propiedades mecánicas de la placa tubular, son deseables unas buenas propiedades de tracción (elevada carga de rotura, alto límite elástico, buen alargamiento y estricción) que permitan establecer la correspondiente tensión admisible para el cálculo de resistencia estructural.

Asimismo deberá tener unas buenas propiedades de impacto (ensayos de resiliencia y Pellini) que eliminen la posibilidad de rotura frágil.

2.2.2 Soldabilidad

La soldabilidad se define como la capacidad de un material a soldar bajo las condiciones de fabricación impuestas en una estructura especıfica, convenientemente diseñada y para funcionar satisfactoriamente en el servicio deseado.

Se considera generalmente que el acero de baja aleación de la placa tubular es bastante soldable, téngase en cuenta que su contenido de carbono es inferior al 0,35%. Se dispone de una amplia variedad de procesos para soldar satisfactoriamente el acero al carbono, con propiedades y composición similar en la soldadura y el material base.

El término soldabilidad se usa también en un sentido más estrecho para significar la facilidad con la que se puede soldar un material sin agrietamiento o generación de otras discontinuidades.

En general, los materiales usados en los generadores de vapor deben ser fácilmente soldables y, por tanto, permitir que, una vez unidos así, formando el generador, no tiendan a generar costuras que sean frágiles y/o contengan defectos tales como grietas. El carbono equivalente de estos aceros será el adecuado para que las uniones generadas sean

sanas. Los materiales que forman parte de los Códigos de diseño habituales (como el ASME III NB) ya están debidamente seleccionados para que tengan la soldabilidad adecuada.

2.2.3 Maquinabilidad y forjabilidad

La maquinabilidad puede basarse en la vida útil de la herramienta, la velocidad de corte, el consumo de energía, la calidad del acabado superficial y las alimentaciones resultantes de la fuerza de empuje.

Al igual que con otras propiedades tales como la resistencia, dureza y ductilidad, el contenido de carbono y aleantes es el factor dominante en la mecanización.

Las operaciones de conformado de aceros de baja aleación incluyen cualquier método de deformación plástica del material para conseguir el componente deseado. Se incluyen flexión (tanto caliente como fría), laminado, extrusión, dibujo y forja. Los aceros de baja aleación son capaces de formarse extensivamente debido a la ductilidad relativamente alta del material. El conformado se realiza a bajas temperaturas puede tanto aumentar la resistencia como reducir la ductilidad del componente, a veces requiriendo un tratamiento térmico posterior para aliviar las tensiones. El conformado en caliente puede afectar las propiedades del material y puede requerir un tratamiento térmico para recuperar esas propiedades. El forjado se realiza con el acero en condiciones de alta temperatura en el rango de 1350 ° C, con un endurecimiento creciente a medida que aumenta la velocidad de forjado. Generalmente, los aceros de baja aleación se pueden forjar con gran éxito. La forja da como resultado propiedades mejoradas al generar una estructura de grano más fino (el grano del lingote es muy basto) con una textura de fibra que sigue la dirección de forjado que va a coincidir con la dirección de mayor tensión de servicio. La forja también puede reducir la porosidad.

Al tratarse de materiales dúctiles y tenaces (para evitar una posible rotura frágil) y tener bajos contenidos de carbono y aleantes (para favorecer la soldabilidad), la maquinabilidad de estos aceros no es excelente, pero

dada la calidad del agua presente, así como el hecho de que trabajen a fatiga a bajo número de ciclos, resulta adecuada.

2.3 Estudio de tensiones

2.3.1 Cilindros de pared delgada bajo presión interna

Los generadores de vapor constan de paredes con geometrías cilíndricas (en el cuerpo) esféricas (en la base del generador) y planas (placa-tubular). Bajo la presión interna de servicio el material de estas paredes se ve sometido a tensiones.

Para facilidad del estudio, el generador puede ser analizado de manera simple suponiendo que sus paredes son delgadas. En general, "pared delgada" se refiere a una relación de radio interior a espesor de pared de 10 o más ($r/t > 10$).

Específicamente, cuando $r/t = 10$, los resultados de un análisis de pared delgada predicen un esfuerzo que es casi 4% menor que el esfuerzo máximo real. Para razones r/t mayores, este error será aún menor.

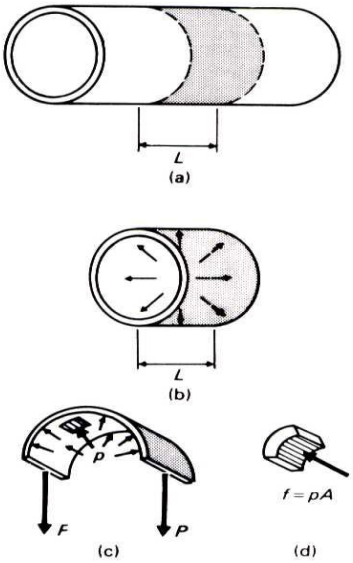
Cuando la pared es "delgada", la distribución del esfuerzo a través de su espesor "t" no variará de manera significativa, y por tanto se supondrá que es uniforme o constante. Con esta suposición, se analizará ahora el estado de esfuerzo la zona cilíndrica del generador. Se entiende que la presión dentro del recipiente es la presión manométrica, ya que mide la presión por encima de la presión atmosférica, la que se supone existe tanto en el interior como en el exterior de la pared del recipiente.

Por la ley de Pascal, se entiende que la distribución de la presión causada por un fluido se distribuye de forma uniforme en el generador; sin embargo esta presión se debe analizar en sus componentes radiales y longitudinales, siendo que la resistencia del recipiente no será la misma para cada una de ellas.

2.3.2 Tensión circunferencial o radial

La presión "p" del fluido multiplicado por el área proyectada de incidencia de la presión da como resultado una fuerza ejercida por el fluido, así:

Figura 7 Esquema de tensiones radiales en cilindro.



Fuente: Ing. Ruiz Orellana Miguel Alejandro "Recipientes de pared delgada"

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{D \cdot L}$$

Además:

$$F = 2 \cdot P$$

Nos queda entonces:

$$P = \frac{p \cdot D \cdot L}{2}$$

Analizando la resistencia del material:

$$\sigma_r = \frac{F}{A} = \frac{F}{2 \cdot e \cdot L}$$

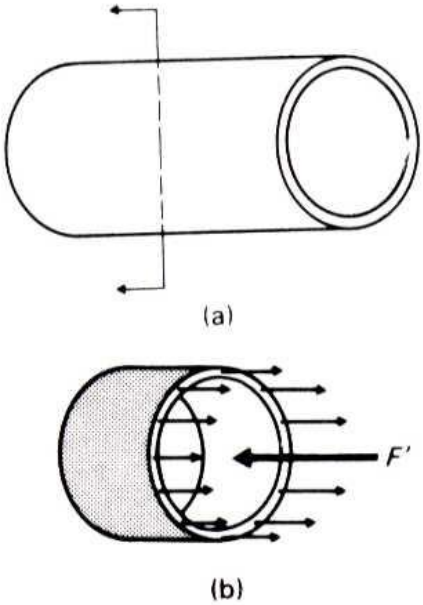
Reemplazando en la primera ecuación de la fuerza:

$$\sigma_r = \frac{p \cdot D \cdot L}{2 \cdot e \cdot L} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot e}$$

2.3.3 Tensión longitudinal

Para encontrar la tensión longitudinal del material producido por la presión interna, prácticamente se sigue el mismo procedimiento anterior, con la diferencia de que el área del recipiente que soporta la presión es la región circunferencial de los extremos, por consiguiente:

Figura 8 Esquema de tensiones longitudinales en cilindro.



Fuente: Ing. Ruiz Orellana Miguel Alejandro "Recipientes de pared delgada"

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)}$$

Además,

$$F = p \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)$$

Analizando la resistencia del material

$$\sigma_r = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \cdot e \cdot D}$$

Reemplazando la primera ecuación de la fuerza:

$$\sigma_r = \frac{p \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)}{\pi \cdot e \cdot D}$$

De donde se obtiene que:

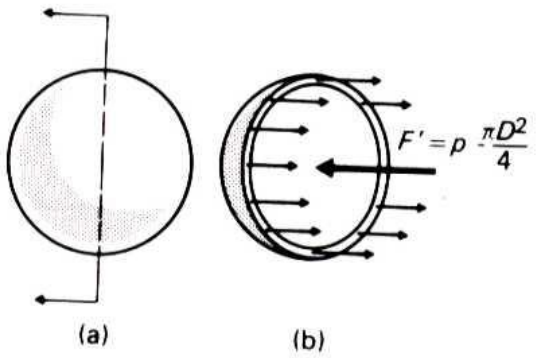
$$\sigma_r = \frac{p \cdot D}{4 \cdot e}$$

2.3.4 Esfera de pared delgada, sometida a presión interna

El análisis de éste geometría del generador de vapor es semejante al análisis de la zona cilíndrica del mismo sometida a tensiones longitudinales, enfatizando la igualdad que se hace respecto de la presión del fluido y la resistencia del material.

De esta manera se puede anotar:

Figura 9 Esquema de tensiones en esfera de pared delgada.



Fuente: Ing. Ruiz Orellana Miguel Alejandro "Recipientes de pared delgada".

$$F = p \cdot A_{proyectada} = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \ldots (1)$$

El esfuerzo en las paredes del generador de vapor con geometría esférica será:

$$\sigma_{esf} = \frac{F}{A}$$

De donde:

$$F = \sigma_{esf} \cdot A = \sigma_{esf} \cdot \pi \cdot t \ldots (2)$$

Igualando las expresiones (1) y (2)

$$\sigma_{esf} \cdot \pi \cdot D \cdot e = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$\sigma_{esf} = \frac{p \cdot D}{4 \cdot e}$$

2.3.5 Cálculo del espesor de la placa tubular mediante normativa ASME Sección III

En los apartados anteriores hemos obtenido:

Tensión circunferencial o radial del cilindro:

$$\sigma_r = \frac{p \cdot D}{2 \cdot e}$$

Tensión esfera de paredes delgadas:

$$\sigma_{esf} = \frac{p \cdot D}{4 \cdot e}$$

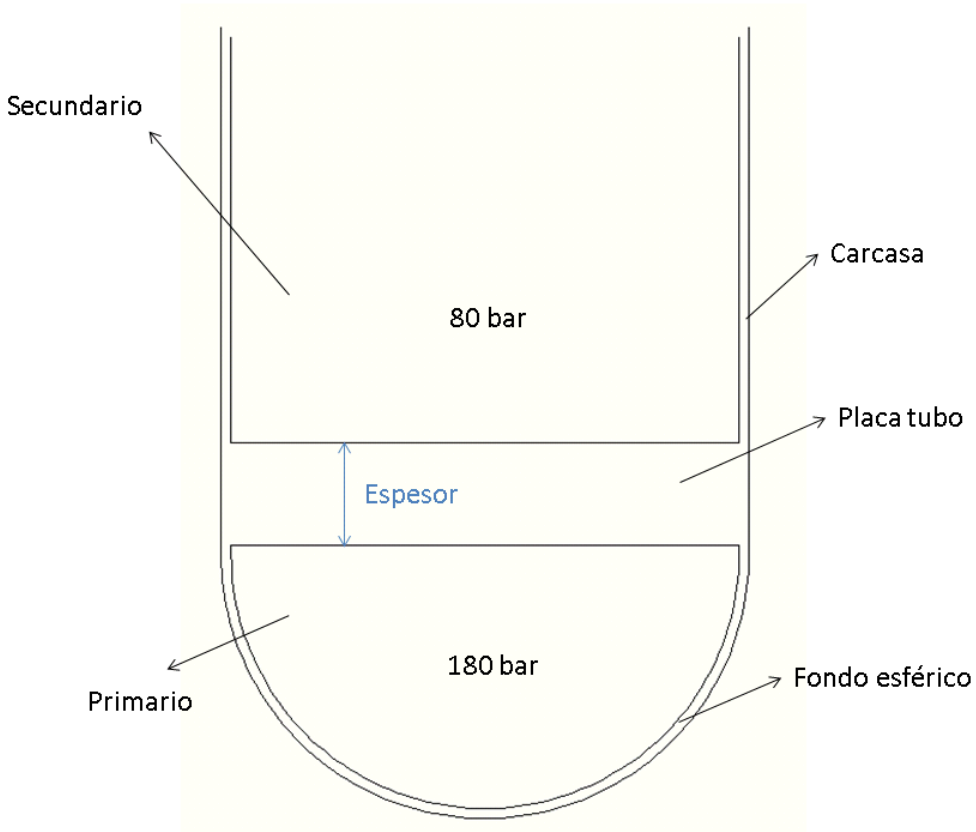
Igualando tensiones se obtiene:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{esf}}{2}$$

La tensión que puede soportar la geometría cilíndrica es la mitad de la que puede soportar la esférica.

Por este motivo y además por estar perforada, el espesor de la placa tubular es grande, del orden de medio metro de espesor.

Figura 10 Esquema de presiones y espesor de la placa tubular.



Fuente: Elaboración propia.

3 Taladrado profundo de la placa tubular

3.1 Introducción

Ilustración 10 Diferentes herramientas para el taladrado profundo.

Fuente: www.americanmachinist.com.

El taladrado profundo es un proceso de fabricación utilizado para hacer agujeros relativamente profundos. En este proceso el diámetro del agujero se crea mediante el giro de una broca.

Ilustración 11 Herramienta sistema BTA taladrado profundo de plaquitas atornilladas.

Fuente: www.globalsne.com/drilling.

Comúnmente es un método de manufactura para producir ejes o cilindros huecos (como el cuerpo de un cañón). Se buscará concentricidad (así el grosor de la pared sea constante), y un buen acabado (ausencia de errores de forma y baja rugosidad en la superficie interior generada).

Por otro lado, el perforado profundo se puede llevar a cabo en partes que no son cilíndricas, pero esto muy probablemente requerirá una forma especial para acomodar y sujetar la herramienta a fin de darle soporte y facilitar el procedimiento.

Ilustración 12 Conjunto de brocas de taladrado sistema BTA de diferentes diámetros de corte y plaquitas.

Fuente: www.globalsne.com/drilling.

3.2 Antecedentes históricos

Los métodos modernos de taladrado profundo se desarrollaron a finales del siglo XIX y durante todo el siglo XX para responder a las necesidades de la industria armamentística.

En la década de 1870, tras la invención de la pólvora sin humo por un químico francés (que aumentaba la potencia más de seis veces en relación a la pólvora negra) fue necesario fabricar cañones de fusil mucho más resistentes. Hasta entonces se producían mediante técnicas de forjado. Tiras de acero en caliente se enroscaban en un vástago con diámetro igual al calibre. Mediante el martilleo se soldaban las junturas y el diámetro interior resultaba muy preciso. Luego se producían las muescas por brochado. Con este método la pólvora sin humo reventaba los cañones a los pocos disparos. Los ingenieros decidieron fabricar los cañones taladrando barras macizas.

El primer desarrollo fue la Broca Cañón. A finales de 1800 comenzaron a producirse las primeras armas con este sistema. Fueron famosos los fusiles Mauser fabricados en Alemania y los Springfield en Inglaterra y USA. Durante la Segunda Guerra Mundial hubo la necesidad de aumentar la producción drásticamente de buques de guerra y submarinos.

Para fabricar tubos de cañón naval, periscopios de submarino y ejes de propulsión se desarrolló el sistema BTA (Boring and Trepanning Association), que también se conoce como STS (Single Tube System). El sistema permitía trabajar cuatro veces más rápidamente. En los años 1950 se patentó el sistema Ejector (Sandvik Coromant). A diferencia de STS que requería maquinas especiales, el sistema Ejector se pensó para ser adaptado a maquinas-herramientas convencionales. Constaba de dos tubos, uno interior y otro exterior. Como en STS la viruta con el fluido de corte se evacuaba por el tubo interior dando además de mayor rapidez que la broca cañón mejor precisión.

3.3 Sistemas y métodos de taladrado

3.3.1 Sistema de broca cañón

La perforación mediante el sistema de broca cañón es un proceso de perforación de taladrado profundo en el que se utiliza una herramienta de corte larga y delgada para producir orificios en metal a altas proporciones de profundidad-diámetro. Éste tipo de perforación es efectiva para diámetros pequeños, además puede aplicarse con facilidad utilizando un pre-taladrado como guía.

La herramienta difiere de un taladro de torsión convencional por su geometría de cabeza única. Una broca estándar tiene un único filo de corte eficaz que elimina las virutas a medida que avanza en una pieza de trabajo de metal.

Ilustración 13 Sistema de taladrado broca cañón.

Fuente: www.unisig.com.

El proceso es capaz de perforar agujeros profundos más allá de lo que es posible con maquinaria convencional y herramientas tales como brocas de hélice, mediante el uso de fluido de corte con aditivos de extrema presión a alta presión para permitir retirar la viruta, incluso a profundidades extremas.

El refrigerante se suministra a través de un conducto, situado en el interior de la broca, directamente al filo de corte, tras lo cual elimina la viruta a través de un canal de desahogo con forma de V hasta el exterior de la broca. Debido a la ranura en V, la sección transversal del tubo ocupa 3/4 de la circunferencia.

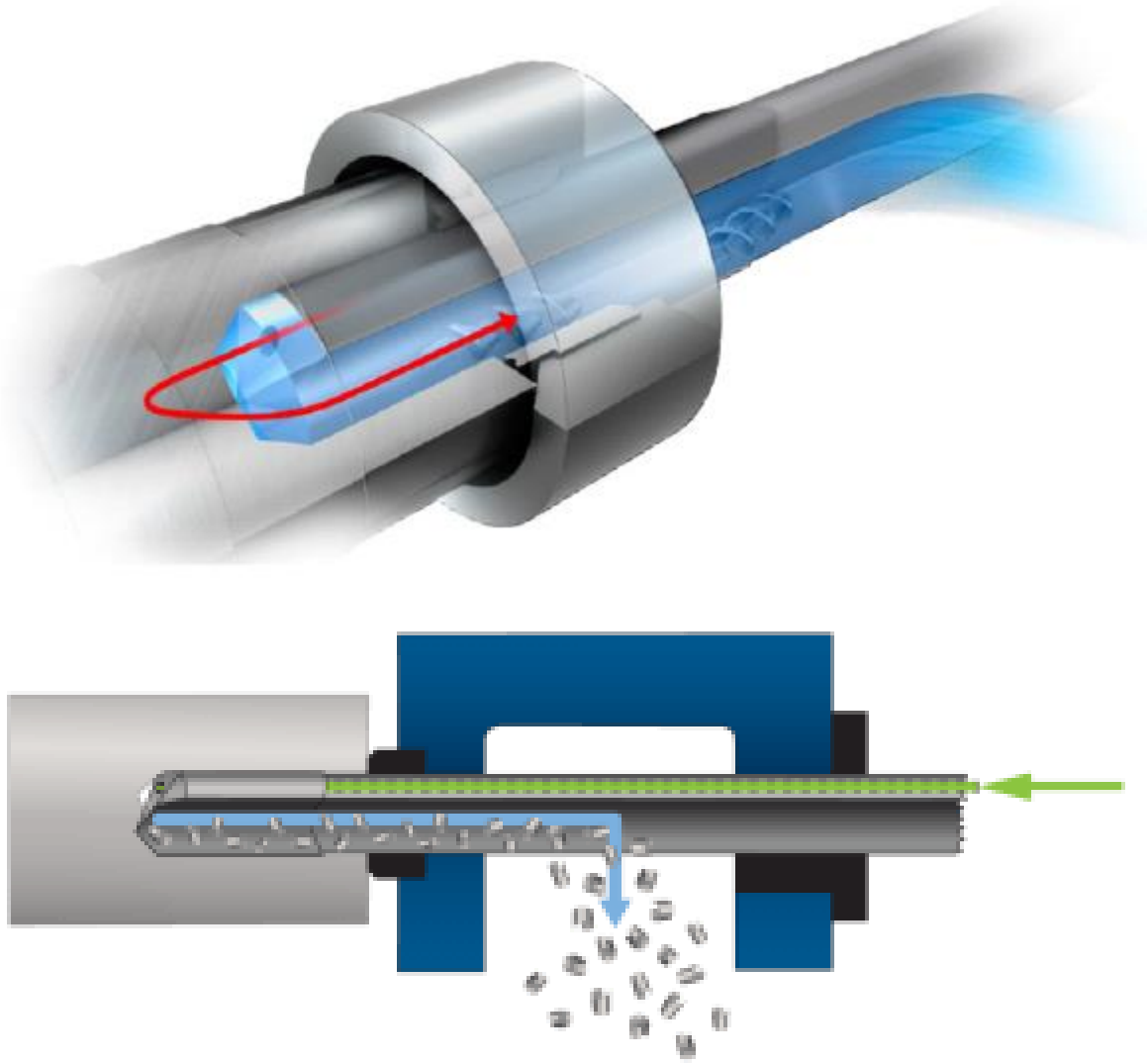
Ilustración 14 Detalle de broca cañón.

Fuente: www.unisig.com.

Éste tipo de mecanizado fue desarrollado originalmente para la fabricación de cañones de armas, donde tanto la rectitud como la durabilidad del cañón eran esenciales para el buen funcionamiento de las armas.

Las armas de fuego siguen siendo una aplicación común. Otras industrias incluyen componentes de combustible diesel, herramientas médicas, moldes de inyección de plástico y más.

Figura 11 Esquema del circuito seguido por el fluido de corte y las virutas en el sistema de taladrado broca cañón



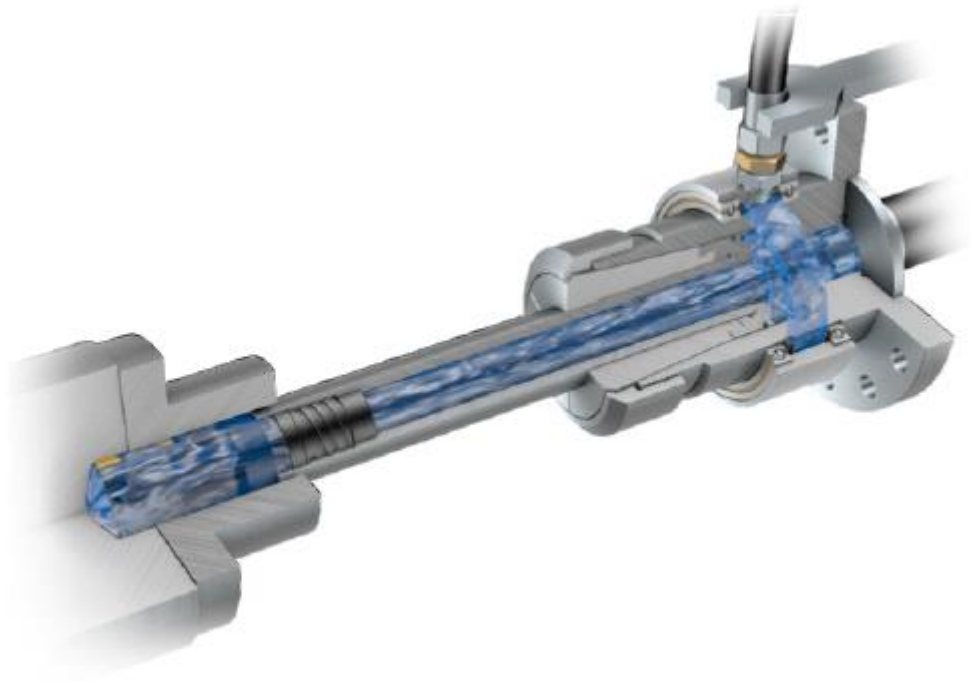
Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

3.3.2 Sistema Ejector

El sistema Ejector es sencillo y barato de aplicar en máquinas de husillo horizontal (tornos, centros de mecanizado). Se compone de una cabeza de broca, un tubo exterior, un tubo interior, una pinza y un manguito de sellado.

La cabeza de broca se monta en el tubo de taladrado a través de una rosca. El tubo de taladrado y el tubo interior se fijan en el conector a través de una pinza y un manguito de sellado.

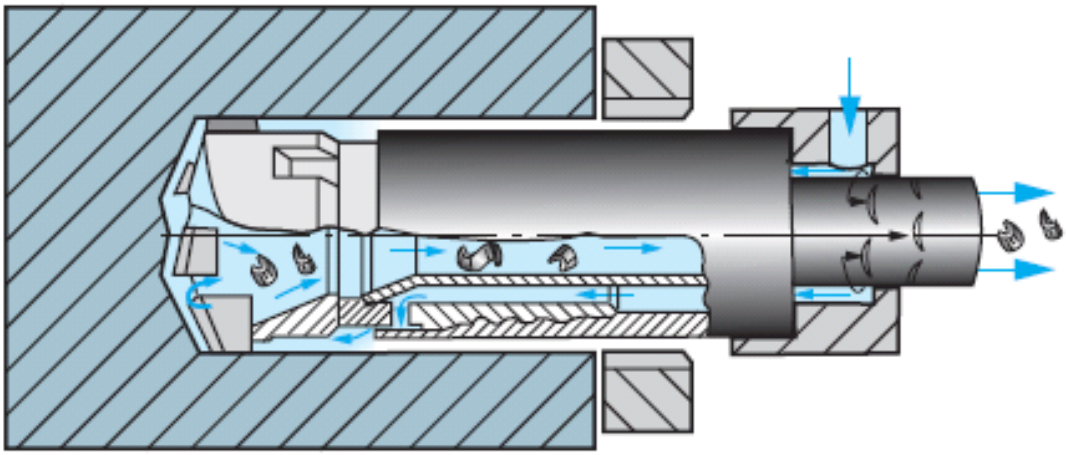
Figura 12 Sistema Ejector.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

El fluido de corte fluye por el espacio anular existente entre los tubos exterior e interior hasta los filos de la cabeza de la broca y empuja a la viruta para que discurra hacia el exterior a través del tubo interior.

Figura 13 Esquema del circuito de fluido de corte / viruta en el Sistema Ejector.

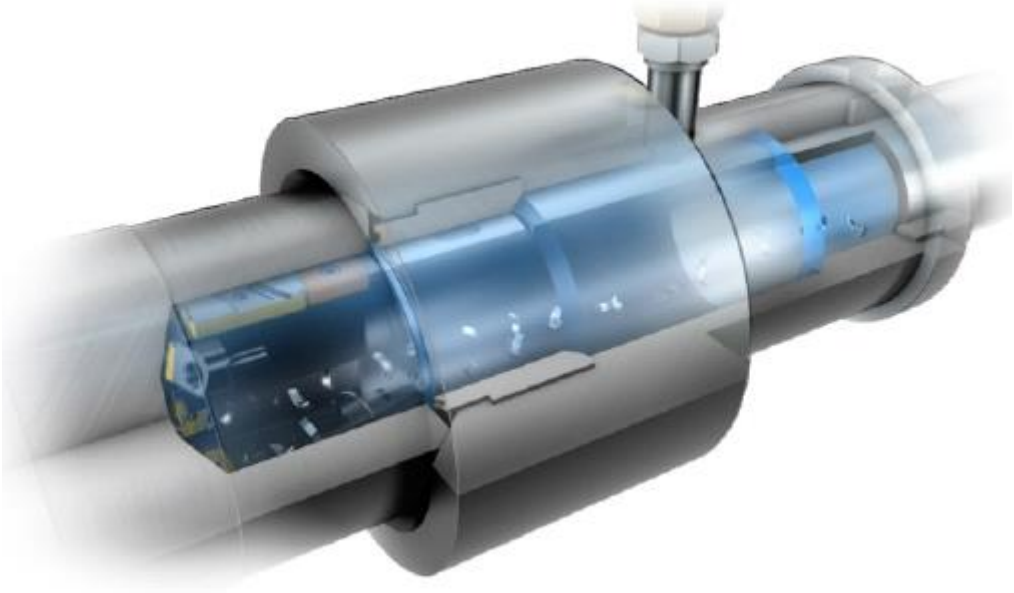


Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Cuando se utiliza el sistema Ejector, no es necesario utilizar una junta de sellado entre la pieza y el casquillo de la broca.

3.3.3 Sistema de un solo tubo BTA

Figura 14 Sistema de un solo tubo BTA.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

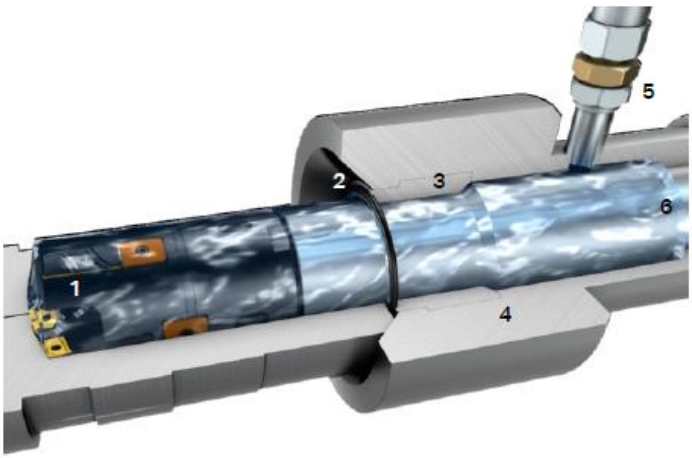
BTA significa Boring and Trepanning Association, y también se conoce a veces como perforación STS (single tube system), ya que utiliza un solo tubo de perforación para la herramienta, en comparación con el sistema Ejector, que utilizan dos.

Es un proceso de perforación profunda que utiliza una herramienta especializada en un tubo largo para producir agujeros profundos en metal con un diámetro mayor o igual que unos 15 milímetros aproximadamente.

Ilustración 15 Herramienta sistema BTA montada en máquina de taladrado

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Figura 15 Diferentes componentes del montaje de la herramienta.



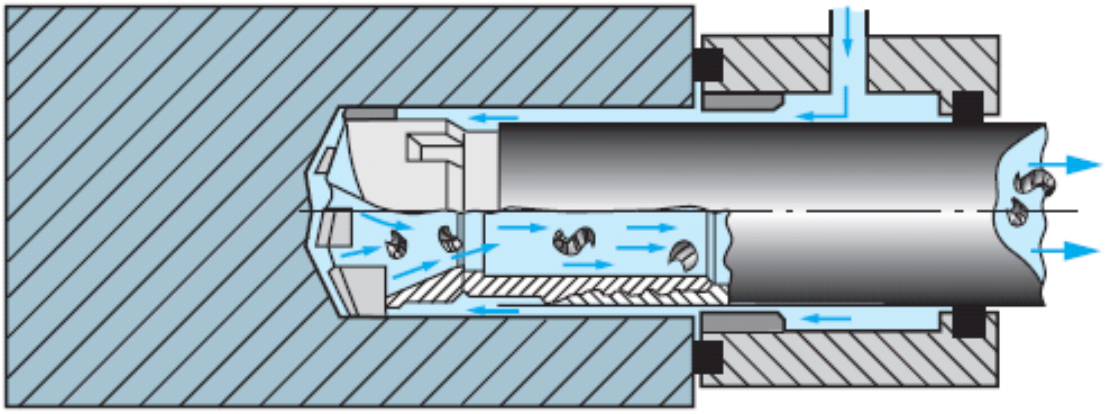
1. Cabeza de broca
2. Junta de sellado
3. Casquillo taladrado
4. Cabeza de presión de aceite
5. Entrada de refrigerante
6. Tubo de taladrado

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Los cabezales de la herramienta de perforación BTA están roscados y montados en tubos de perforación largos y usan múltiples superficies de corte en una sola herramienta para extraer las virutas de manera

eficiente, expulsándolas utilizando un fluido de corte a alta presión que entra entre la pared del agujero ya hecho y el tubo de perforación, llega hasta la cabeza de la broca y luego retorna, empujando la viruta por dentro del tubo de perforación. Las herramientas BTA están disponibles en configuraciones de metal duro soldado o insertado.

Figura 16 Esquema del circuito que sigue del fluido de corte y la viruta en el sistema de taladrado BTA.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

3.3.4 Selección del sistema BTA para taladrar nuestra placa

El taladrado sistema BTA es el utilizado para el mecanizado de la placa tubular puesto que es el método más efectivo para perforar agujeros profundos, ya que es un proceso limpio, fiable y capaz, y puede alcanzar diámetros mayores y velocidades de alimentación más altas que el taladrado cañón o el sistema Ejector.

Razones por las cuales se selecciona este método de taladrado profundo frente a otros:

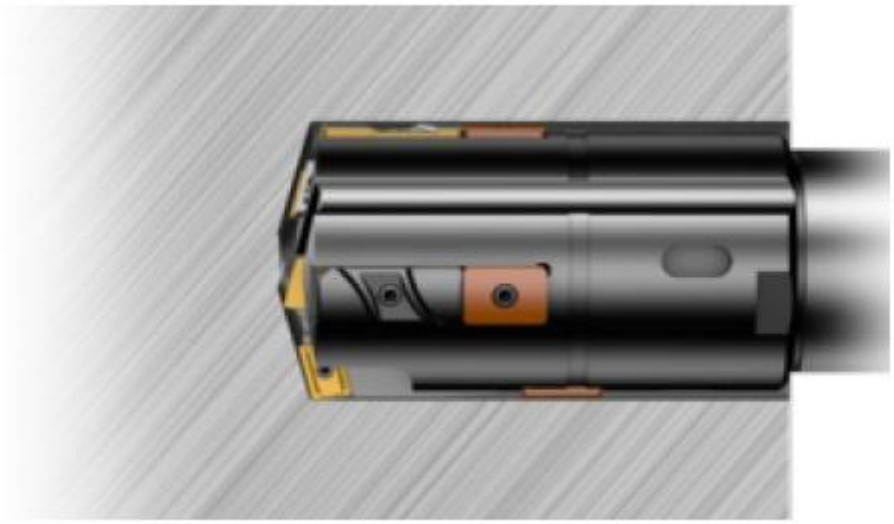
- Se mecanizan materiales con malas propiedades de formación de viruta tales como acero inoxidable austenítico y aleación de níquel.
- Acabado de los taladrados es de alta calidad.
- Ventajoso para la producción en serie.
- Abrevia trabajos de mecanizado que, de otra forma, se dilatarían en el tiempo.

- Permite trabajar piezas de gran tamaño que sean uniformes.

3.4 Variantes dentro del sistema BTA

3.4.1 Taladrado enterizo

Figura 17 Esquema del método de mecanizado profundo por taladrado enterizo.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

El taladrado enterizo es el método más común. Implica el mecanizado de un agujero en material sólido. A menudo, el diámetro del agujero, la rectitud y el acabado superficial son tan buenos que no se requiere ningún mecanizado subsiguiente.

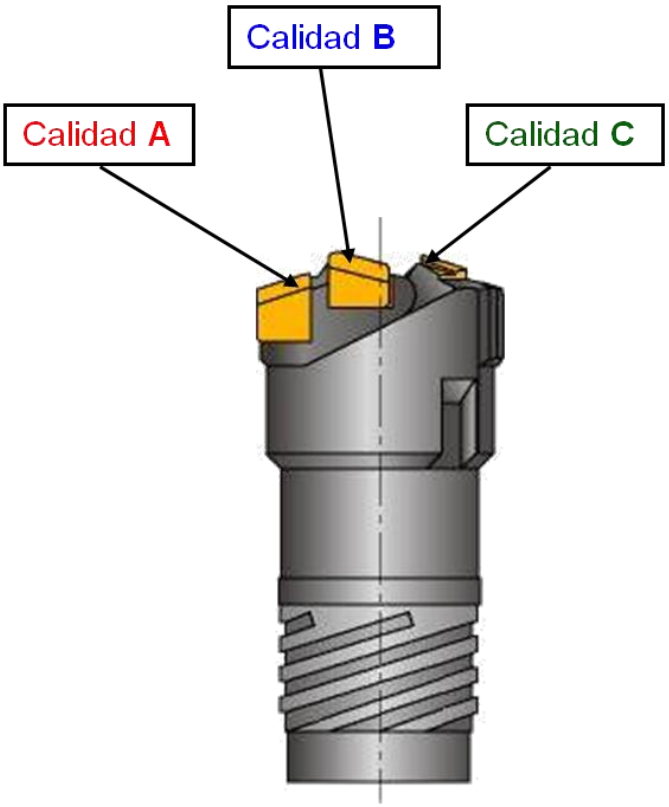
El taladrado enterizo es el método de taladrado que se utiliza para las perforaciones la placa tubular. Ha continuación se indican otros posibles métodos para el taladrado BTA.

3.5 Herramienta a utilizar en nuestra placa tubular

La herramienta de taladrado profundo difiere de otras desde su aspecto de construcción hasta detalles en su geometría. Tres componentes principales en la herramienta de taladrado profundo son: su punta, su cuerpo y su mango.

Las cabezas con varias plaquitas soldadas permiten conjugar diferentes calidades según la posición de la plaquita y su velocidad de corte.

Figura 18 Detalle plaquitas soldadas en broca BTA.



Fuente: Josep Ll. Casbas, "Herramientas de Corte. Características y Aplicaciones".

La Calidad B suele ser la más blanda y la A la más dura.

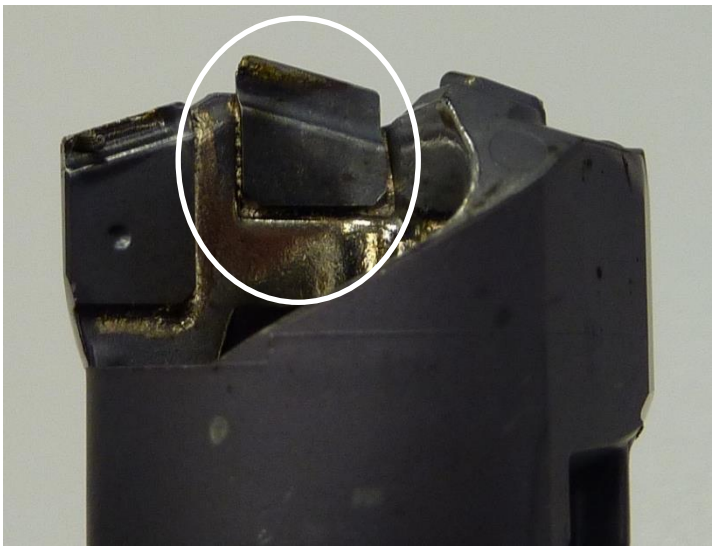
Dependiendo del diámetro a mecanizar las cabezas puede tener 1,2 o 3 plaquitas. Las plaquitas de corte y los patines pueden estar atornillados o soldados (soldadura fuerte) dependiendo del diámetro del taladrado. Los filos están solapados para obtener virutas más pequeñas.

Cada plaquita tiene radios, ángulos de ataque y anchos de rompe virutas distintos con el objeto de obtener la mejor resistencia y el mejor control de viruta, en tamaño y dirección de salida.

Para que el primer contacto herramienta-pieza no sea brusco y desequilibre el corte, las plaquitas y patines entran en contacto progresivamente:

1. Plaquita Central:

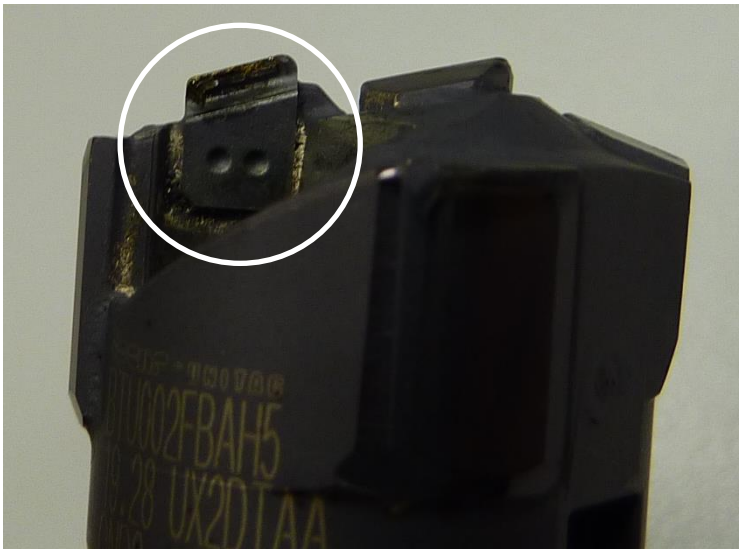
Ilustración 16 Plaquita central de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

2. Plaquita Intermedia:

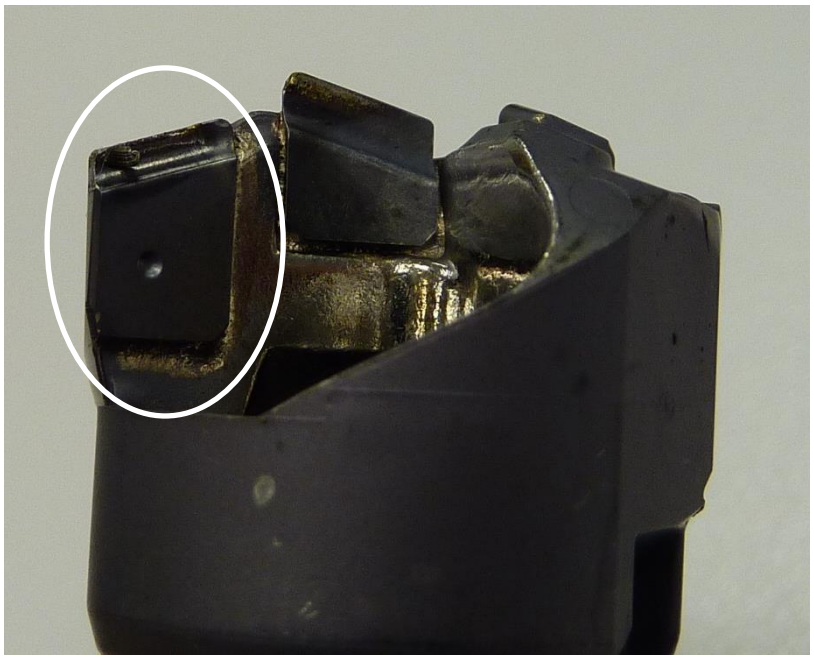
Ilustración 17 Plaquita intermedia de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

3. Plaquita Periférica:

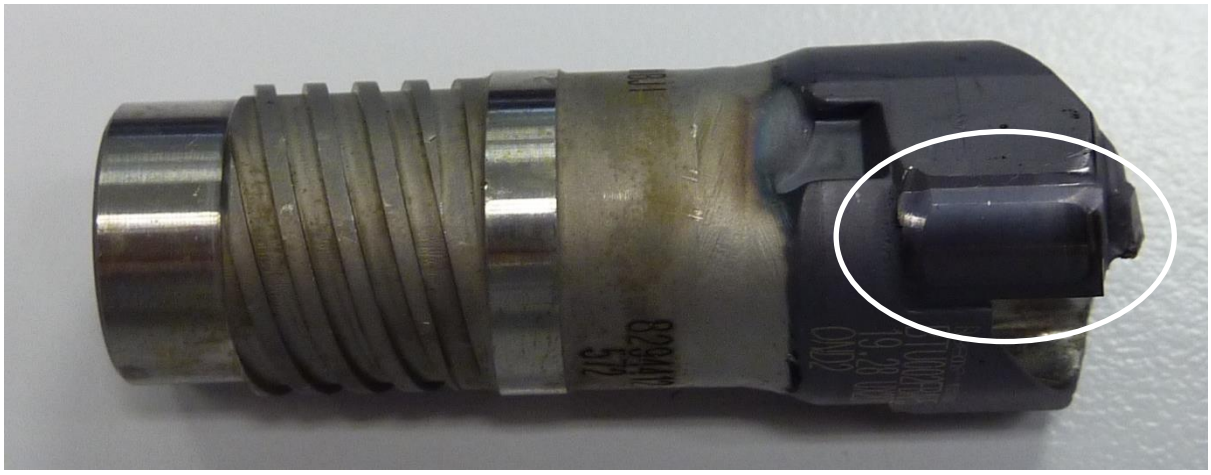
Ilustración 18 Plaquita periférica de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

4. Patín:

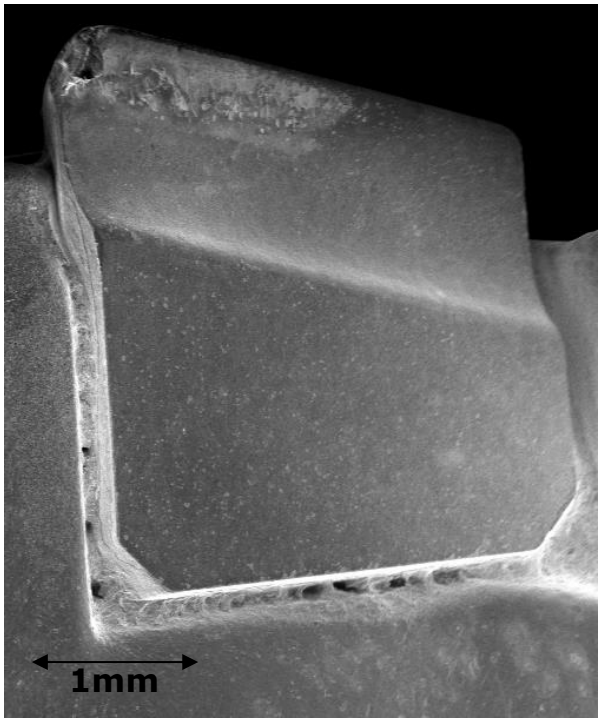
Ilustración 19 Patín de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

La superficie de contacto con la pieza no ha de tener un ángulo de menos de 150º para evitar que entre en contacto la plaquita Intermedia antes que la Central ya que produciría vibraciones a la entrada además de la posible rotura de plaquita.

Ilustración 20 Foto mediante microscopio electrónico de barrido de la plaquita intermedia de una broca BTA tras su vida de corte: Obsérvese la soldadura fuerte alrededor y el filo arriba.



Fuente: Elaboración propia.

3.6 Diseño de nuestra herramienta

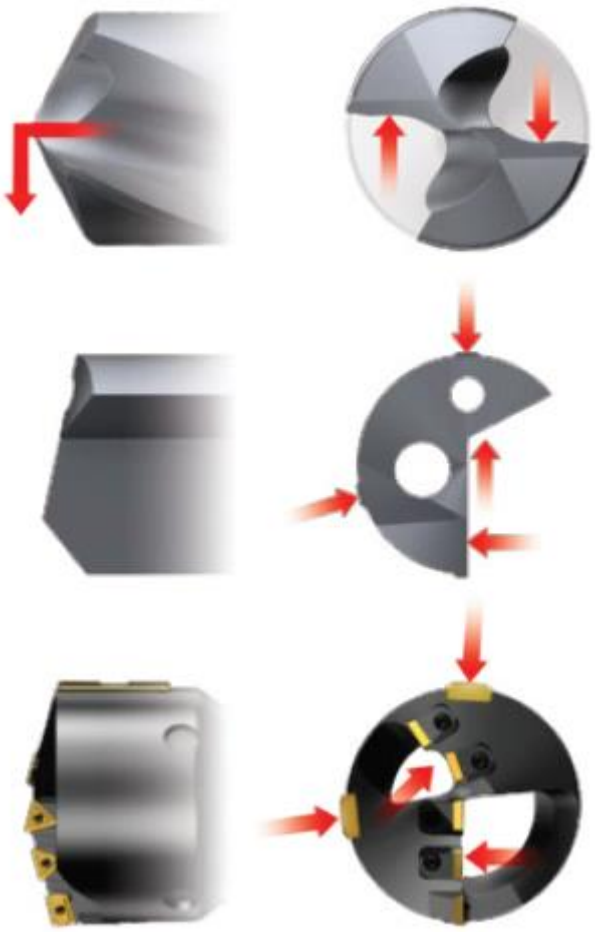
El diseño geométrico varía entre los diferentes tipos de herramienta. Cuando la zona del filo se divide de forma simétrica, con unos filos de corte igual de largos a ambos lados de la línea central de la broca, esta se considera equilibrada.

La geometría asimétrica, utilizada en el mecanizado de agujeros profundos, implica que las fuerzas de corte no se compensan.

Para absorber las fuerzas de corte radiales en la periferia de la broca, estas "brocas desequilibradas" disponen de patines guía. Y la fuerza de corte es dirigida entre los patines guía.

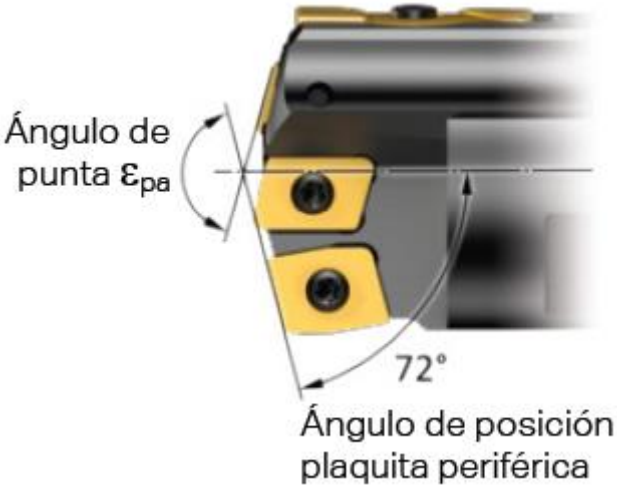
Al dividir el filo en una serie de filos ubicados a ambos lados de la línea central de la broca, gran parte de las fuerzas dirigidas al patín guía son eliminadas (ver figura).

Figura 19 Esquema de fuerzas dirigidas al patín de la herramienta. Superior broca taladro, intermedia broca cañón e inferior sistema BTA.



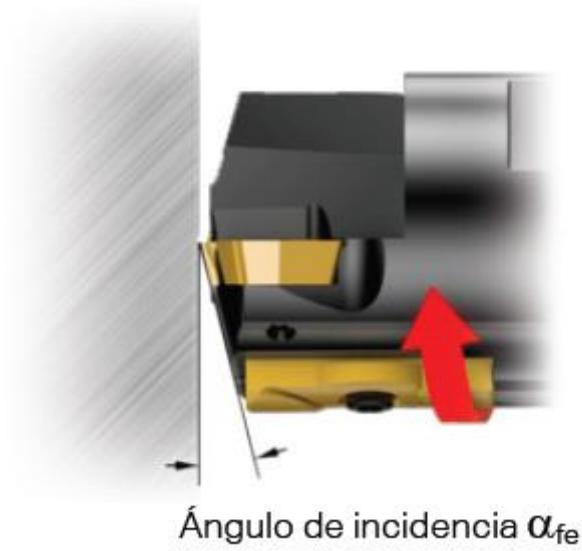
Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Figura 20 Ángulo de punta y ángulo de posición de la plaquita de la periferia.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

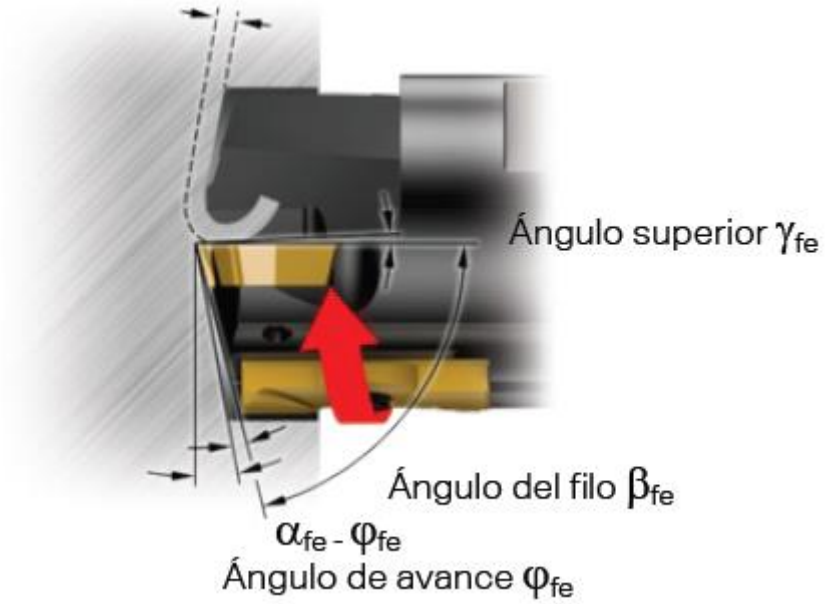
Figura 21 Ángulo de incidencia.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

El tamaño del ángulo de incidencia δ_{fe} es proporcional al avance fz y el diámetro DC.

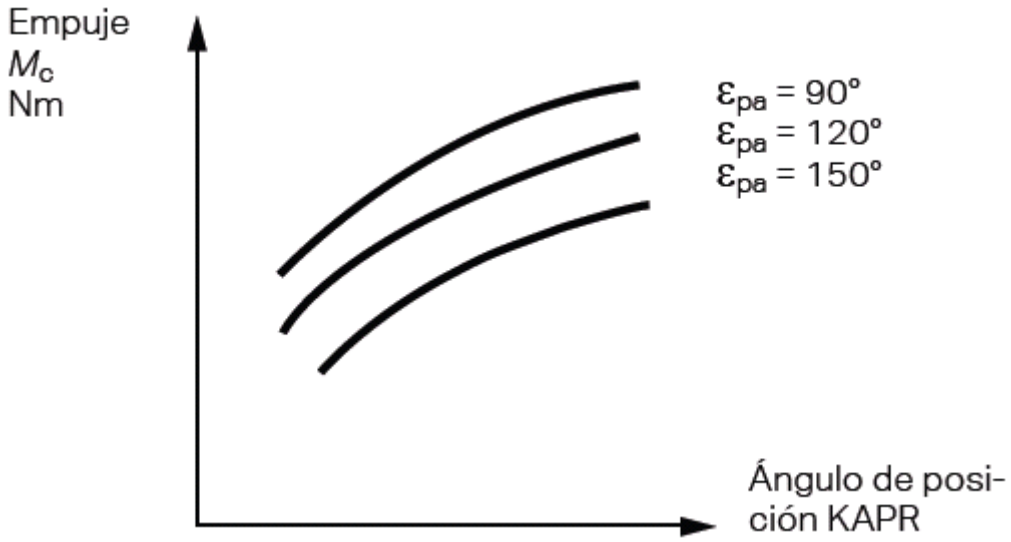
Figura 22 Ángulo de avance, ángulo del filo y ángulo superior.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

El ángulo de incidencia de la plaquita debe ser mayor en el centro que en la periferia.

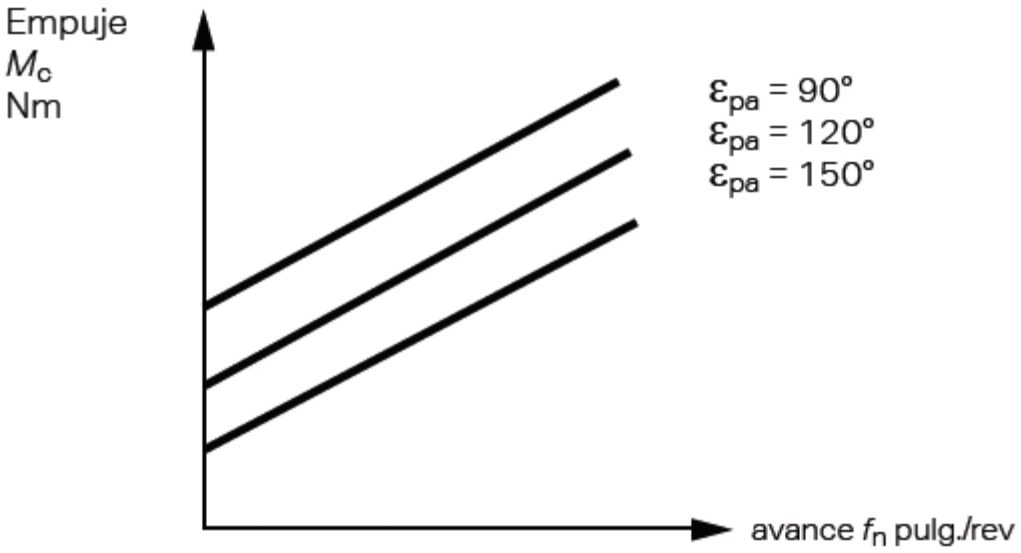
Figura 23 Relación entre el empuje y el ángulo de posición KAPR.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Un ángulo de punta grande ofrece un empuje reducido.

Figura 24 Relación entre el empuje y el avance de la herramienta.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

El empuje incrementa a medida que aumentan el avance y el ángulo de posición.

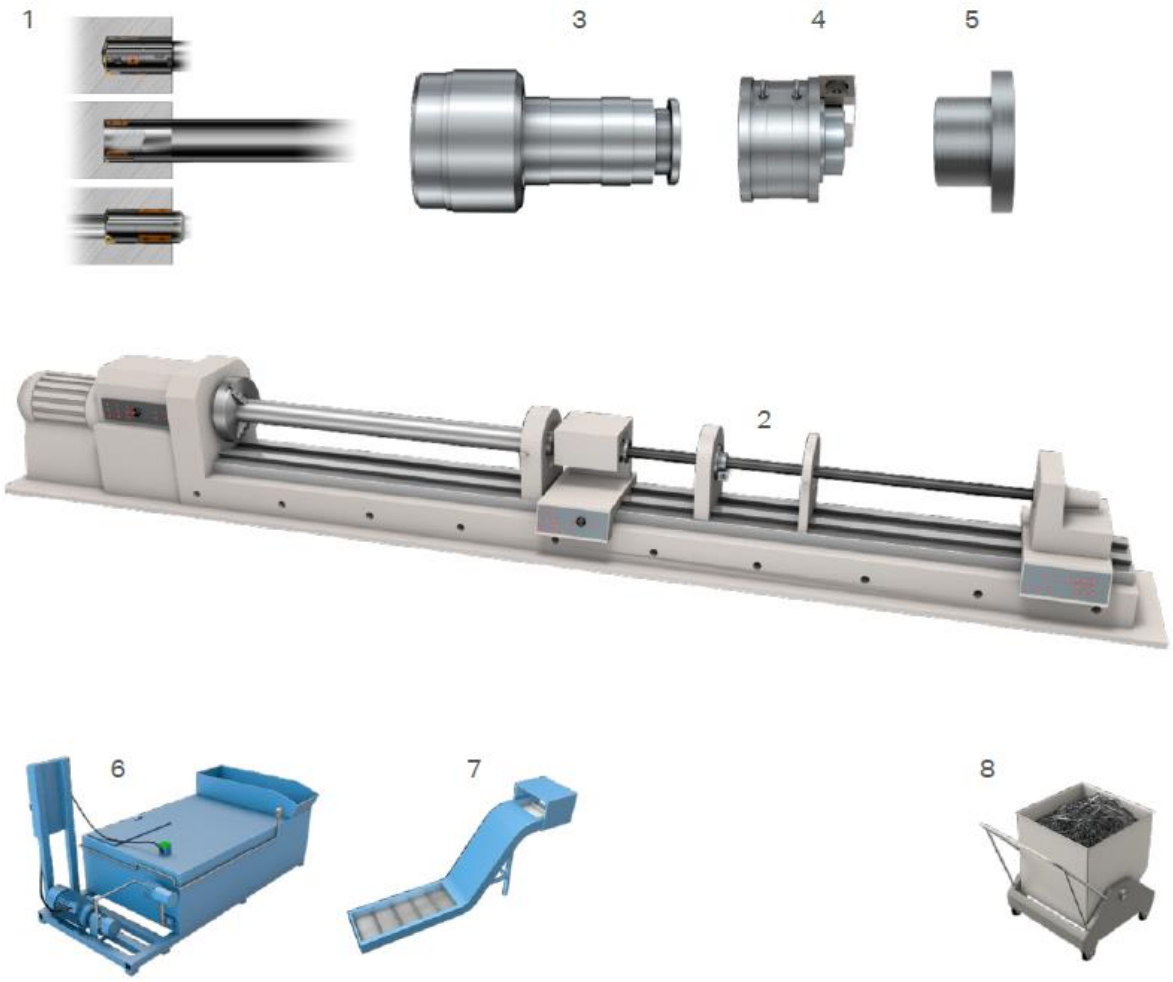
Tabla 1 Tabla de durezas y calidades de las plaquitas de la herramienta y los respectivos rompe virutas.

Plaquita	P		M		K	N	S
	Rompevirutas						
	4	4	3/2	3	4	4	4
	Combinación de calidades						
	P45	P42	M23	M22	KS12	KS12	KS12
C = Central	P40	P40	M35	M35	K20	N20	S15
I = Intermedia	P10	P30	M35	M35	K20	N20	S15
P = Periférica	P10	P30	M25	M35	K20	N20	S15
S = Patín guía	P20	P20	M20	M20	K20	N20	S15

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

4 Montaje de la herramienta y cálculo de los parámetros de corte

Figura 25 Esquema de montaje de herramienta BTA (incluye sistema de refrigeración y recogida de virutas).



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

1. Herramientas para taladrado enterizo.
2. Tubo.
3. Cabeza de presión.
4. Amortiguador antivibratorio.
5. Portapinzas de conexión BTA.
6. Unidad de refrigerante (depósito y refrigeración).
7. Transportador de viruta.
8. Cesta.

4.1 Datos de corte

La principal consideración al seleccionar datos de corte para el taladrado es garantizar una buena rotura de la viruta.

Para la selección de los mismos tenemos que prestar especial atención a:

- El material que se va a mecanizar, en nuestro caso acero de baja aleación (material que produce filo superpuesto) con un plaqueado de aleación de níquel (material también tendente a producir filo superpuesto).
- Las condiciones de mecanizado específicas.

Pueden utilizarse diferentes calidades de metal duro en las plaquitas. La calidad con una mayor resistencia al desgaste por abrasión se utiliza en la periferia donde la velocidad de corte es máxima, mientras que la plaquita central requiere una calidad más tenaz.

En la elección de la calidad, en relación a la pieza de trabajo, lo más importante es la seguridad frente a la rotura y evitar el filo superpuesto.

Tabla 2 Tabla de datos de corte para la herramienta proporcionada por el fabricante.

ISO	Núm. MC(Núm. CMC)	Material	Fuerza de corte específica k_{c1} N/mm²	Dureza Brinell HB	Combinación de calidades	Velocidad de corte v_c m/min	Diám. de taladrado, mm 15.60-20.00 Avance f_n mm/r	20.01-31.00	31.01-43.00	43.01-65.00
		Acero no aleado								
P	P1.1.Z.AN (01.1)	No templado 0,10-0,25% C	1500	90-200	45/42	70-120	0.14-0.20[1)]	0.15-0.20[1)]	0.15-0.25	0.18-0.28
	P1.2.Z.AN (01.2)	No templado 0,25-0,55% C	1600	125-225	45/42	70-120	0.14-0.20[1)]	0.15-0.20[1)]	0.15-0.25	0.18-0.28
	P1.3.Z.AN (01.3)	No templado 0,55-0,80% C	1700	150-250	45/42	70-120	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.24-0.32
	P1.3.Z.AN (01.4)	Acero con alto contenido en carbono, recocido	1800	180-275	45/42	70-120	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.24-0.32
		Acero de baja aleación								
	P2.1.Z.AN (02.1)	No templado	1700	150-260	45/42	70-100	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.20-0.30
	P2.5.Z.HT (02.2)	Endurecido y templado	1900	220-450	45/42	55-100	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.24-0.32
		Acero de alta aleación								
	P3.0.Z.AN (03.11)	Recocido	1950	150-250	45/42	70-100	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.24-0.32
	(03.13)	Acero rápido (HSS) recocido	2150	150-250	45/42	70-100	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.24-0.32
	P3.0.Z.HT (03.21)	Acero de herram. templado	2900	250-350	45/42	55-100	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.24-0.32
	(03.22)	Acero templado, otros	3100	250-450	45/42	55-100	0.14-0.20	0.17-0.25	0.20-0.30	0.24-0.32
		Fundición								
	P1.5.C.UT (06.1)	No aleado	1400	90-225	45/42	50-100	0.12-0.18	0.15-0.22	0.20-0.28	0.24-0.32
	P2.6.C.UT (06.2)	Baja aleación (elementos de aleación < 5%)	1600	150-250	45/42	50-100	0.12-0.18	0.15-0.22	0.20-0.28	0.24-0.32
	(06.32)	Inoxidable austenítico	1750	150-250	M23[2)]/M22/ M22C	50-85	0.16-0.20	0.18-0.25	0.22-0.30	0.24-0.36
	(06.33)	Acero al manganeso, 12–14% Mn	2900	200-300	M23[2)]/M22/ M22C	35-70	0.16-0.20	0.18-0.25	0.22-0.30	0.24-0.36

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Requisitos dimensionales del taladrado se detallan a continuación:

- Espesor de placa 600 milímetros.
- Diámetro de agujero 20 milímetros.
- Tolerancia dimensional del agujero ±0,05 milímetros.
- Tolerancia de posición 0,3 milímetros.
- Tolerancia de perpendicularidad 0,5 milímetros.

4.2 Selección de la herramienta

Para la selección de la herramienta y los demás componentes necesarios para poder realizar el trabajo de mecanizado, nos apoyaremos en un proveedor.

El mismo, nos asesorará sobre nuestras necesidades y nos aconsejará dependiendo de las necesidades concretas del trabajo que vayamos a realizar.

Para taladrados profundos y basándonos en herramientas como la que hemos estudiado se nos ofreces las siguientes opciones:

Tabla 3 Tabla del suministrador de brocas sistemas BTA y Ejector.

		CoroDrill® 808	
		STS	Ejector
Diámetro de broca, DC		15.60-65.00	18.40-65.00
Profundidad de taladrado, LU		150 x DC	100 x DC
Página		14	14
Acabado superficial Ra		2 µm	2 µm
Tolerancia de agujero		IT9	IT9
Máquina			
– Máquinas DHD		Sí	–
– Máquinas CNC		–	Sí
– Tornos		–	Sí
– Mayoría de máquinas convencionales		–	Sí
– Centros de mecanizado		–	Sí
– Máquinas especiales para brocas cañón		–	–
Material de la pieza a trabajar			
– Acero	P	Buenas	Buenas
– Acero inoxidable	M	Buenas	Buenas
– Fundición	K	Buenas	Buenas
– Aleaciones de aluminio	N	Buenas	Buenas
– Aleaciones termorresistentes	S	Buenas	Buenas
Herramienta			
– Suministro de refrigerante interior:		Sí	Sí
– Tipo de plaquita		–	–

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

En la figura anterior podemos ver el tipo de broca utilizado para los mecanizados de la placa tubular, en dónde se especifican el diámetro de

la broca, la profundidad de taladrado admitida y la compatibilidad para mecanizar diferentes materiales entre otra información.

Ilustración 21 Herramienta BTA de plaquitas soldadas.

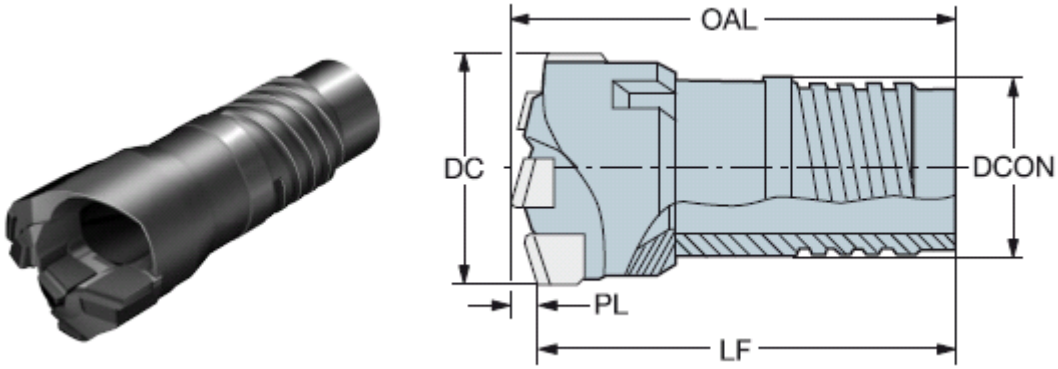
Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Para realizar el trabajo de mecanizado de la placa tubular utilizaremos la broca comercial de la imagen superior.

Las características técnicas de esta herramienta se enumeran a continuación:

- Fácil de utilizar
  - Sin prerreglaje
  - No requiere mantenimiento en sala de herramientas
- Un rendimiento fiable
  - Diseño robusto que admite una velocidad de avance elevada
  - Geometrías de plaquita sinterizadas que garantizan un control de la viruta consistente y sin complicaciones en la mayoría de materiales
  - Recubrimiento especial diseñado para una tenacidad y resistencia al desgaste elevadas

Figura 26 Esquema de geometrías de herramientas BTA suministradas por el proveedor.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Tabla 4 Tabla de geometrías de herramientas BTA suministradas por el proveedor.

				P			M			Dimensiones, mm, pulg.										
DC	DC*	CZC_{MS}	Código de pedido	43C	M22	M23	43C	M22	M23	DCON	DCON*	OAL	OAL*	LF	LF*	PL	PL*	RE	RE*	Kg
16.21	.638	97	808-9724D1621	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.22	.639	97	808-9724D1622	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.23	.639	97	808-9724D1623	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.24	.639	97	808-9724D1624	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.25	.640	97	808-9724D1625	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.26	.640	97	808-9724D1626	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.27	.641	97	808-9724D1627	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.28	.641	97	808-9724D1628	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.29	.641	97	808-9724D1629	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.31	.642	97	808-9724D1631	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.32	.643	97	808-9724D1632	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.33	.643	97	808-9724D1633	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.34	.643	97	808-9724D1634	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.35	.644	97	808-9724D1635	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.36	.644	97	808-9724D1636	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.37	.644	97	808-9724D1637	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
16.38	.645	97	808-9724D1638	☆			☆			12.60	.496	43.00	1.692	40.30	1.587	2.70	.106	0.2	.008	0.019
17.71	.697	99	808-9914D1771	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
17.71	.697	99	808-9914D1772	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
17.73	.698	99	808-9914D1773	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
17.74	.698	99	808-9914D1774	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
17.75	.699	99	808-9914D1775	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
17.76	.699	99	808-9914D1776	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
17.77	.700	99	808-9914D1777	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
17.78	.700	99	808-9914D1778	☆			☆			14.50	.570	47.00	1.850	44.20	1.740	2.80	.110	0.2	.008	0.022
19.25	.758	00	808-0024D1925	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
19.26	.758	00	808-0024D1926	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
19.27	.759	00	808-0024D1927	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
19.28	.759	00	808-0024D1928	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
19.29	.759	00	808-0024D1929	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
19.30	.760	00	808-0024D1930	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
19.31	.760	00	808-0024D1931	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
19.32	.761	00	808-0024D1932	☆			☆			15.50	.610	47.00	1.850	44	1.732	3.00	.118	0.2	.008	0.026
25.00	.984	03	808-0313D2500		☆			☆		19.50	.767	57.50	2.263	54.15	2.132	3.35	.131	0.2	.008	0.059
25.37	.999	03	808-0324D2537	☆			☆			19.50	.767	57.50	2.263	54	2.126	3.50	.137	0.2	.008	0.061
25.38	.999	03	808-0324D2538	☆			☆			19.50	.767	57.50	2.263	54	2.126	3.50	.137	0.2	.008	0.061
25.39	1.000	03	808-0324D2539	☆			☆			19.50	.767	57.50	2.263	54	2.126	3.50	.137	0.2	.008	0.061

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Para realizar el mecanizado seleccionaremos un DC (diámetro de corte) de 20 milímetros.

Para ese diámetro de corte las geometrías de la herramienta serán las que se muestran en la siguiente tabla:

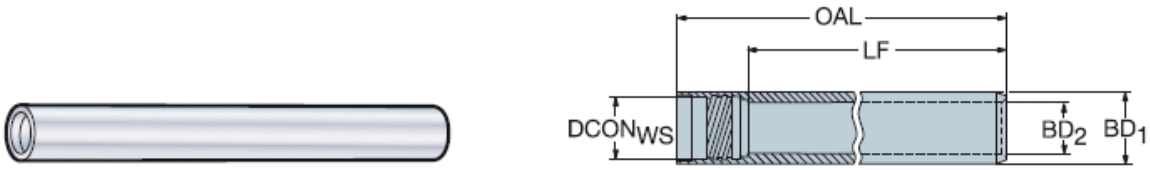
Tabla 5 Principales geometrías de la herramienta seleccionada para el mecanizado de la placa tubular.

Diámetro de conexión al tubo	15,50	milímetros
Longitud total de la herramienta	47,00	milímetros
Longitud hasta el filo	44,20	milímetros
Profundidad del filo	3,00	milímetros

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

4.3 Tubo de la herramienta

Figura 27 Geometría de los tubos de la herramienta.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Tabla 6 Tabla de geometría de tubos del proveedor.

DCON$_{WS}$ es igual que DCON para la broca

CZC$_{MS}$	Código de pedido del tubo de taladrado	Dimensiones, mm, pulg. BD1	BD1"	BD2	BD2"	DCON$_{WS}$	DCON$_{WS}$"	OAL	OAL"	LF	LF"
94	420.5-794-2	11.0	.433	7	2.756	8.2	.323	1600	62.992	1578.0	62.126
95	420.5-795-2	12.0	.472	8	3.150	9.2	.362	1600	62.992	1578.0	62.126
96	420.5-796-2	13.0	.512	8.5	3.347	10.2	.402	1600	62.992	1579.0	62.165
97	420.5-797-2	14.0	.551	9	3.543	12.6	.496	1600	62.992	1579.0	62.165
98	420.5-798-2	15.0	.591	10	3.937	13.6	.535	1600	62.992	1579.0	62.165
99	420.5-799-2	16.0	.630	10.5	4.134	14.5	.571	1600	62.992	1578.0	62.126
00	420.5-800-2	17.0	.669	11.5	4.528	15.5	.610	1600	62.992	1578.0	62.126
01	420.5-801-4	18.0	.709	12	4.724	16.0	.630	2600	102.362	2575.0	101.378
02	420.5-802-4	20.0	.787	13	5.118	18.0	.709	2600	102.362	2574.0	101.339
03	420.5-803-4	22.0	.866	14	5.512	19.5	.768	2600	102.362	2574.0	101.339
04	420.5-804-4	24.0	.945	15.5	6.102	21.0	.827	2600	102.362	2574.0	101.339
05	420.5-805-4	26.0	1.024	17	6.693	23.5	.925	2600	102.362	2571.0	101.220
06	420.5-806-4	28.0	1.102	18.5	7.283	25.5	1.004	2600	102.362	2571.0	101.220
07	420.5-807-4	30.0	1.181	20	7.874	28.0	1.102	2600	102.362	2571.0	101.220
08	420.5-808-4	33.0	1.299	23	9.055	30.0	1.181	2600	102.362	2564.0	100.945
09	420.5-809-4	36.0	1.417	25.5	10.039	33.0	1.299	2600	102.362	2564.0	100.945
10	420.5-810-4	39.0	1.535	28	11.024	36.0	1.417	2600	102.362	2564.0	100.945
11	420.5-811-4	43.0	1.693	31	12.205	39.0	1.535	2600	102.362	2564.0	100.945
12	420.5-812-4	47.0	1.850	35	13.780	43.0	1.693	2600	102.362	2560.0	100.787
13	420.5-813-4	51.0	2.008	39	15.354	47.0	1.850	2600	102.362	2560.0	100.787
13E	420.5-813E-4	57.0	2.244	39	15.354	51.0	2.008	2600	102.362	2560.0	100.787

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Seleccionamos un tubo compatible con nuestra herramienta. En nuestro caso para un CZC$_{MS}$=00, las geometrías de nuestro tubo serán:

Tabla 7 Principales geometrías del tubo seleccionado.

Diámetro exterior	17,00	milímetros
Diámetro interior	11,50	milímetros
Diámetro de conexión a la herramienta $DCON_{WS}$	15,50	milímetros
Longitud del tubo	1600	milímetros
Longitud hasta el filo	1578	milímetros

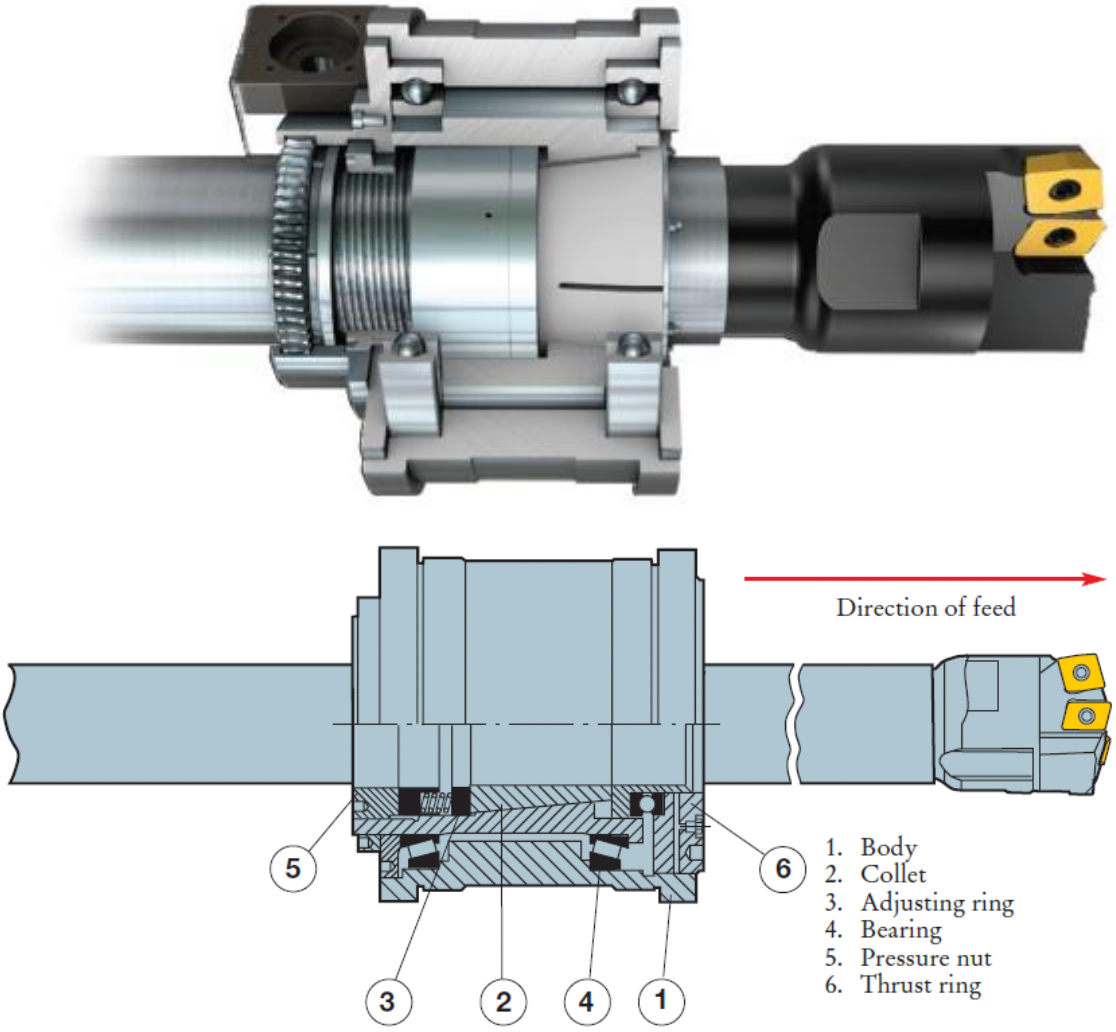
Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

4.4 Sistema anti vibraciones

Las vibraciones pueden afectar el acabado superficial y la calidad del agujero.

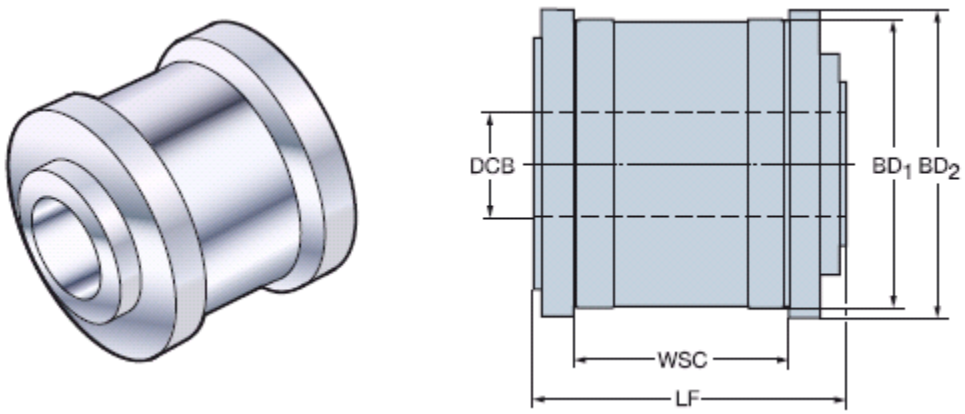
Para eliminar las vibraciones puede aplicarse un amortiguador anti vibratorio para limitar las vibraciones.

Figura 28 Detalle sistema amortiguador anti vibraciones.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Figura 29 Sistema anti vibración. Esquemas de geometrías.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Tabla 8 Geometrías de sistemas anti vibración del fabricante.

Gama de DC		Tubo				Dimensiones, mm, pulg.									
mm	pulg.	CZC_{WS}	mm	pulg.	Código de pedido	DCB	DCB"	BD1	BD1"	BD2	BD2"	LF	LF"	WSC	WSC"
12.60 - 13.60	.496 - .535	94	11	.433	342-0937-94	11	.433	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
13.61 - 14.60	.536 - .575	95	12	.472	342-0937-95	12	.472	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
14.61 - 15.59	.575 - .614	96	13	.512	342-0937-96	13	.512	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
15.60 -16.70	.614 - .657	97	14	.551	342-0937-97	14	.551	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
16.71 - 17.70	.658 - .697	98	15	.591	342-0937-98	15	.591	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
17.71 - 18.90	.697 - .744	99	16	.630	342-0937-99	16	.630	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
18.91 - 20.00	.744 - .787	00	17	.669	342-0937-00	17	.669	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
20.00 - 21.80	.787 - .858	01	18	.709	342-0937-01	18	.709	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
21.81 - 24.10	.859 - .859	02	20	.787	342-0937-02	20	.787	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
24.11 - 26.40	.949 - 1.039	03	22	.866	342-0937-03	22	.866	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
26.41 - 28.70	1.040 - 1.130	04	24	.945	342-0937-04	24	.945	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
28.71 - 31.00	1.130 - 1.221	05	26	1.024	342-0937-05	26	1.024	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
31.01 - 33.30	1.221 - 1.311	06	28	1.102	342-0937-06	28	1.102	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
33.31 - 36.20	1.311 - 1.425	07	30	1.181	342-0937-07	30	1.181	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
36.21 - 39.60	1.426 - 1.559	08	33	1.299	342-0937-08	33	1.299	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
39.61 - 43.00	1.559 - 1.693	09	36	1.417	342-0937-09	36	1.417	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
43.01 - 47.00	1.693 - 1.850	10	39	1.535	342-0937-10	39	1.535	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
47.01 - 51.70	1.851 - 2.035	11	43	1.693	342-0937-11	43	1.693	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
51.71 - 56.20	2.036 - 2.213	12	47	1.850	342-0937-12	47	1.850	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
56.21 - 65.00	2.213 - 2.559	13	51	2.008	342-0937-13	51	2.008	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
65.00 - 66.90	2.559 - 2.634	14	56	2.205	342-0937-14	56	2.205	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
67.00 - 72.90	2.638 - 2.870	15	62	2.441	342-0937-15	62	2.441	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315
73.00 - 79.90	2.874 - 3.146	16	68	2.677	342-0937-16	68	2.677	180	7.087	195	7.677	195	7.677	135	5.315

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Seleccionamos un sistema anti vibración del mismo diámetro de corte que sea compatible con la herramienta y el tubo que hemos seleccionado:

Tabla 9 Principales geometrías del sistema anti vibración seleccionado.

Gama de diámetro de corte (DC)	20,00	milímetros
Tubo CZC_{MS}=00	17,00	milímetros
Diámetro de conexión al tubo	17,00	milímetros

Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

4.5 Fluido de corte

4.5.1 Conceptos y clasificación de los fluidos de corte

Los fluidos de corte son productos líquidos de composición más o menos compleja que se adicionan en el sistema pieza herramienta viruta de una operación de mecanizado, a fin de lubricar y eliminar el calor producido.

Estos productos reciben con frecuencia, el nombre genérico de "aceites de corte" (cutting oils). Sin embargo, esta denominación no es del todo apropiada, si se tiene en cuenta que algunos de estos productos no contienen la más mínima cantidad de aceite mineral en su composición. Por tanto, la designación "fluidos de corte" (cutting fluids) o si se quiere "fluidos de mecanizado" (metalworking fluids) resulta más correcta.

Atendiendo a su contenido en aceite mineral, los fluidos de corte pueden clasificarse del siguiente modo:

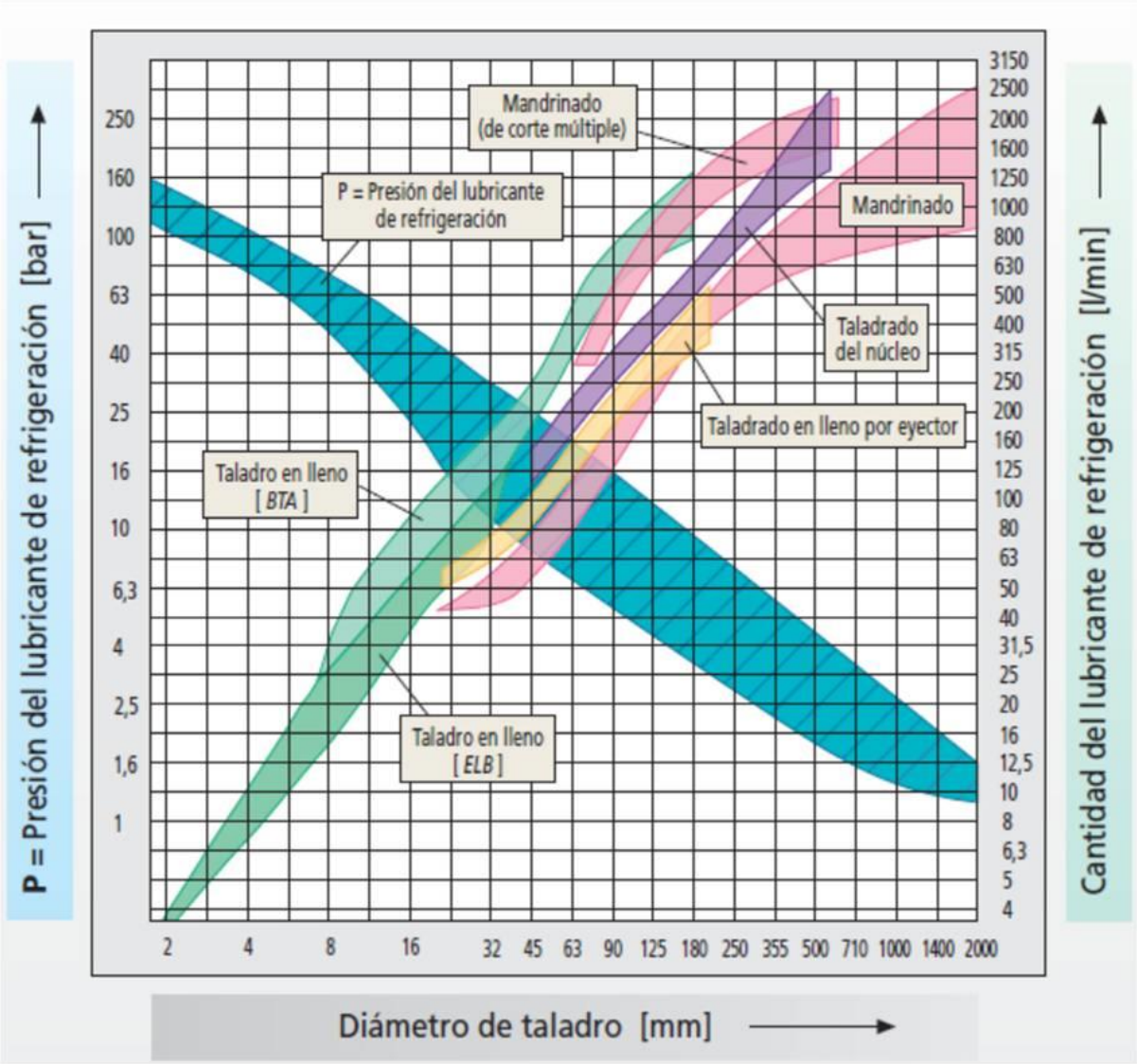
- Fluidos aceitosos o aceites de corte.
- Fluidos acuosos o taladrinas que a su vez pueden ser emulsiones sintéticas o semisintéticas.

Con frecuencia, los fluidos de corte contienen aditivos, con el fin de proporcionarles cualidades determinadas, acordes con el propósito al que se les destina. Entre los aceites de corte, los aditivos más usuales son los de extrema presión. Por lo que respecta a las taladrinas, además de éstos pueden contener emulsionantes, antioxidantes e inhibidores de corrosión, bactericidas y bacteriostáticos, perfumes, colorantes, etc.

Las propiedades esenciales que los líquidos de corte deben poseer son los siguientes:

1. Poder refrigerante: Para ser bueno el líquido debe poseer una baja viscosidad, la capacidad de bañar bien el metal (para obtener el máximo contacto térmico); un alto calor específico y una elevada conductibilidad térmica.
2. Poder lubrificante. Tiene la función de reducir el coeficiente de rozamiento en una medida tal que permita el fácil deslizamiento de la viruta sobre la cara anterior de la herramienta.

Figura 30 Gráfico relación presión-volumen de fluido de corte.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

4.5.2 Objetivos del fluido de corte

- Ayudar a la disipación del calor generado durante la creación de la viruta.
- Lubricar los elementos que intervienen en el corte para evitar la rotura o desafilado de la herramienta.
- Reducir la energía necesaria para efectuar el corte.
- Proteger a la pieza, herramienta y máquina contra la oxidación y corrosión.
- Arrastrar las partículas del material (virutas) de la zona de corte.

- Mejorar el acabado superficial.

4.5.3 Tipos de líquidos de corte

Los principales tipos de fluidos de corte para mecanizado son:

- Los aceite íntegros(Aceites minerales, vegetales, o mixtos)
- Las emulsiones oleosas
- Las "soluciones" semisintéticas
- Las soluciones sintéticas

4.5.4 Selección de fluido de corte para el taladrado de la placa tubular

Esta elección debe basarse en criterios que dependen de los factores:

Del material de la pieza a fabricar

Para las aleaciones ligeras se utiliza petróleo; para la fundición de hierro gris, en seco.

Para el latón, bronce y cobre, el trabajo se realiza en seco o con cualquier tipo de aceite que este exento de azufre; para el níquel y sus aleaciones se emplean las emulsiones. Para los aceros al carbono se emplea cualquier aceite; para los aceros inoxidables auténticos emplean los lubricadores al bisulfuro de molibdeno.

Del material que constituye la herramienta de Corte

Para los aceros al carbono dado que interesa esencialmente el enfriamiento, se emplean las emulsiones; para los aceros rápidos se orienta la elección de acuerdo con el material a trabajar. Para las aleaciones duras, se trabaja en seco o se emplean las emulsiones.

Según el método de trabajo

Para los tornos automáticos se usan los aceites puros exentos de sustancias nocivas, dado que el operario se impregna las manos durante la puesta a punto de la máquina; para las operaciones de rectificado se emplean las emulsiones. Para el taladrado se utilizan los aceites puros de baja viscosidad; para el fresado se emplean las emulsiones y para el brochado los aceites para altas presiones de corte o emulsiones.

Aceite

Se recomienda como primera opción por las siguientes razones:

- Mayor duración de la herramienta. La diferencia puede ser muy significativa y naturalmente depende de la elección del aceite de corte y la emulsión. Normalmente, sin embargo, se obtiene 30% más de vida de la herramienta cuando se utiliza aceite.
- Más rotura de viruta uniforme y una gama más grande de las mismas.
- Cuando se utiliza la emulsión, existe el riesgo de estancamiento si la máquina no está funcionando continuamente. Cuando la máquina esté inactiva, el tanque debe ser aireado para evitar que la emulsión se estanque.
- En los microanálisis por rayos X realizados, se observó la presencia de Azufre (S) y Zinc (Zn) en los mismos. Dado que para el taladrado profundo es necesario la utilización de aceites con propiedades de extrema presión de donde provienen esos elementos.

4.5.5 Cálculos de la capacidad y refrigeración requerida en el taladrado de la plata tubular

El volumen del depósito debe ser suficiente como para proporcionar un filtrado y una refrigeración efectiva. Habitualmente, es necesario utilizar un filtro para separar las virutas y partículas pequeñas del refrigerante.

Normalmente, el depósito de refrigerante debe tener una capacidad 10 veces superior a la capacidad de la bomba. El tiempo de almacenamiento en el depósito debe ser de 5–10 minutos para una refrigeración adecuada.

Como ya hemos dicho, la temperatura del refrigerante debe ser de entre 30–40°C.

El depósito se calienta por:

La energía de taladrado que se genera durante el tiempo de corte de la broca. Dado que esta es la mayor fuente de calor, el tiempo de corte es

decisivo para el calentamiento del depósito. Energía de bombeo. Toda la energía de bombeo se convierte en calor, del cual un 95% es absorbido por el refrigerante.

El depósito se enfría por:

La pérdida de calor del depósito tan pronto como la temperatura del refrigerante es superior a la del entorno. Si el tanque está cubierto, la pérdida de calor se reduce considerablemente. La pieza suele estar a temperatura ambiente y tiene un efecto refrigerante. En las tablas, este efecto refrigerante está calculado para una pieza de las siguientes dimensiones:

Diámetro exterior = 2 x diámetro del agujero

Longitud = 20 x diámetro del agujero.

Máximo tiempo de corte sin refrigeración adicional

Las siguientes fórmulas se pueden usar para calcular el tiempo (T) que se necesita para elevar la temperatura del tanque de 20ºC a 50ºC:

Aceite:

$$T = \frac{14.25 \cdot V}{P} \ (h)$$

Donde V es el volumen del tanque en m^3 y P es el efecto de calentamiento resultante en kW.

Cálculos

Taladrado enterizo por medio de Sistema BTA a un diámetro de orificio de 20 milímetros. El tiempo de corte real se estima en un 50%. El volumen del tanque es de 0.132 m^3

- Potencia de calefacción, total 25 kW
- Potencia de enfriamiento, total 15 kW
- Exceso de calor a enfriar 10 kW

En el caso de utilizar aceite:

$$T = \frac{14.25 \cdot V}{P} = \frac{14.25 \cdot 0.132}{10} = 0.1881 \ h$$

Se necesitarían 11 minutos para calentar un tanque a 50ºC. Esto significa que no se requiere enfriamiento adicional cuando la operación de corte dura como mucho 11 minutos.

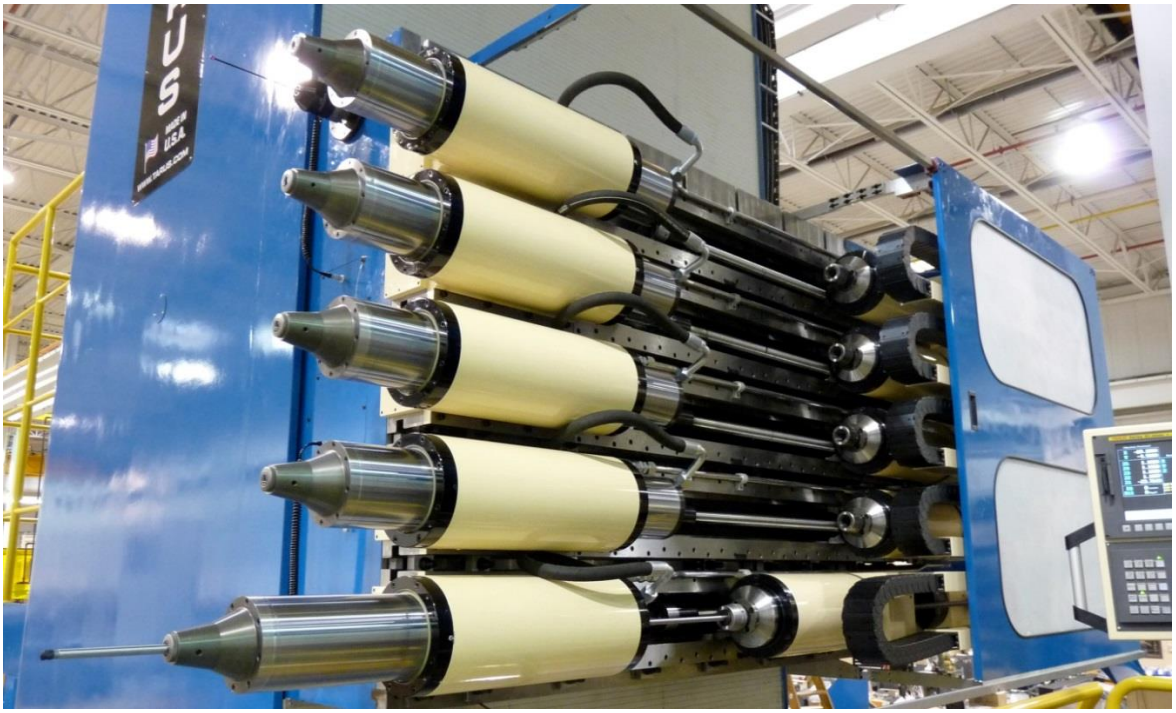
Por este motivo, la operación de taladrado deberá durar menos de 11 minutos cada perforación, para que la máquina sea capaz de evacuar el calor generado durante el proceso de mecanizado.

4.6 Máquina herramienta utilizada para el taladrado profundo de la placa tubular

Ilustración 22 Maquinaria para mecanizados de taladrado profundo.

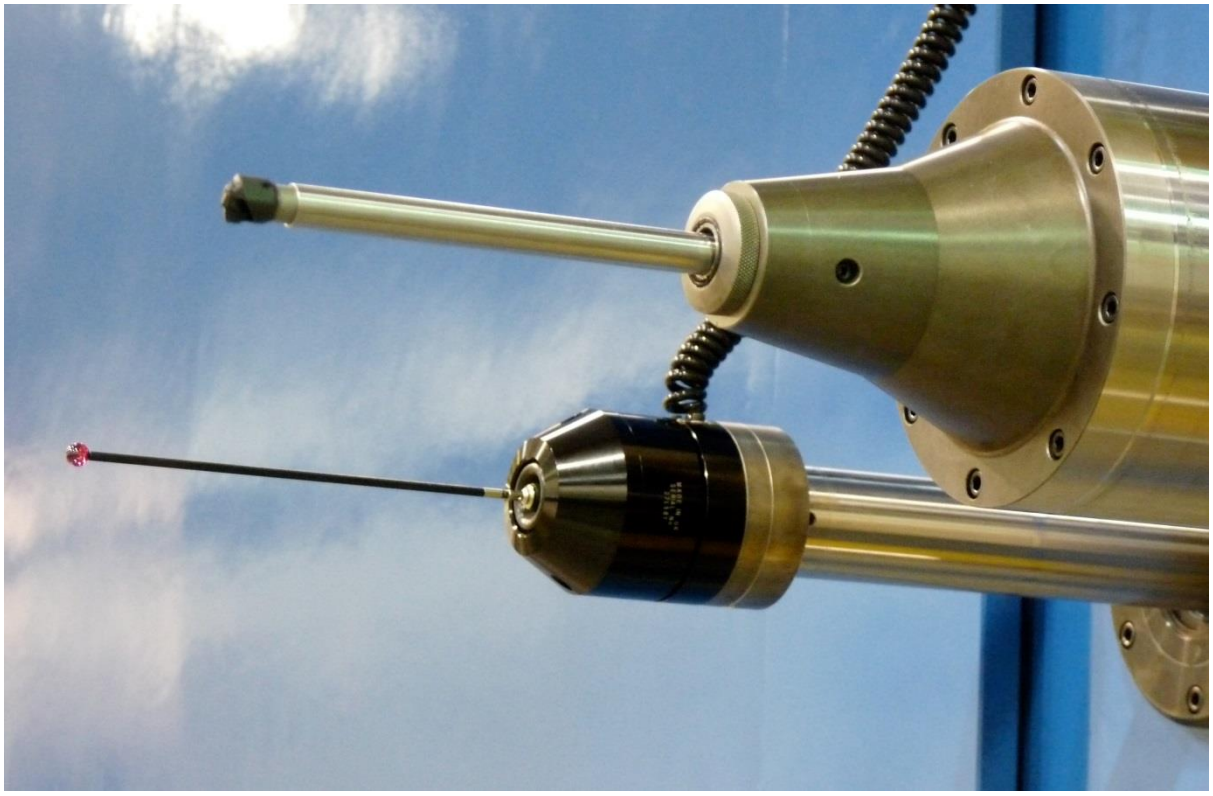
Fuente: www.tarus.com.

Ilustración 23 Cabezales de taladrado sistema BTA.



Fuente: www.tarus.com.

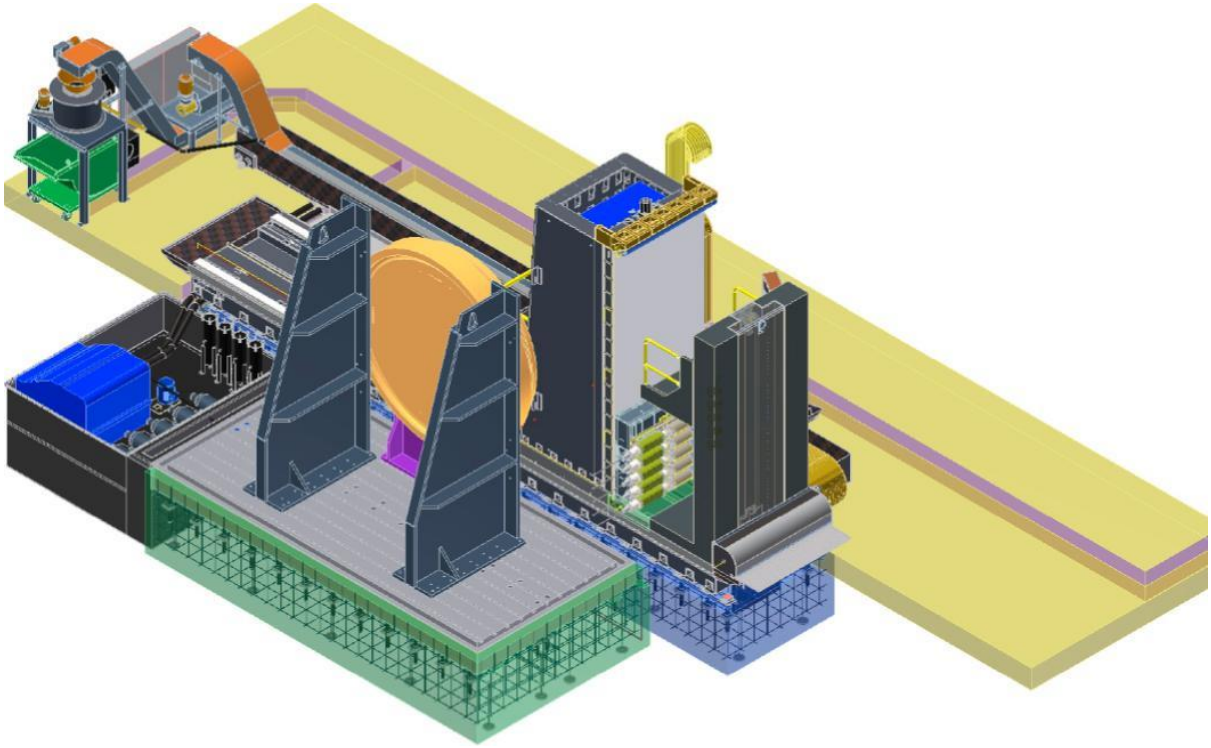
Ilustración 24 Posicionamiento mediante palpador.



Fuente: www.tarus.com.

La taladradora de husillo múltiple se utiliza para perforar agujeros de tubos en chapas de tubos muy grandes para generadores de vapor de centrales nucleares e intercambiadores de calor de procesos industriales.
La taladradora tiene 5 husillos de perforación disponibles.
El espaciado del husillo se puede ajustar manualmente según sea necesario para aplicaciones específicas.
Las cabezas de presión se empujan hidráulicamente y se sujetan contra placa tubular para la perforación. Cada cabezal de presión se puede utilizar o retraer según sea necesario.
Los husillos de perforación se alimentan individualmente, por lo tanto, las herramientas de perforación no utilizadas se pueden dejar en la máquina.
Las herramientas de perforación se accionan mediante motores síncronos refrigerados por líquido.
La máquina herramienta utiliza exclusivamente herramientas STS / BTA.
Los diámetros de agujero que se pueden perforar con ésta máquina son de 16 a 25,4 milímetros.
El procesamiento y la filtración de virutas es un proceso automatizado.
Además, se utilizan sistemas de retroalimentación de cabezal de lectura doble para evitar que un agujero sea perforado en una posición incorrecta.

Figura 31 Esquema de máquina herramienta utilizada para el taladrado profundo de la placa tubular



Fuente: www.tarus.com.

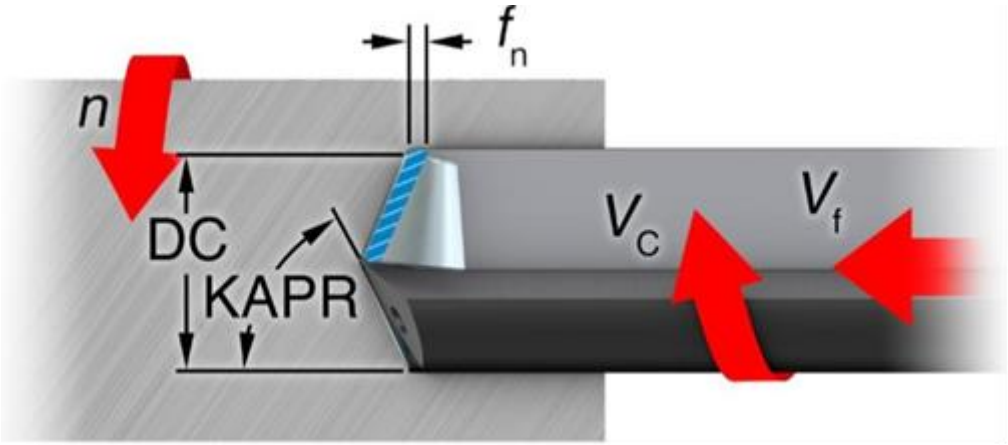
Principales especificaciones de la máquina herramienta:

Diámetro máximo pieza a mecanizar	4572 mm
Profundidad de taladrado	889 mm
Diámetro de taladrado	16 mm ø hasta 25.4 mm ø
Parámetros de taladrado	25 kw, 275 Nm, 0-2000 rpm
Fuerza de avance	5338 Nm cada husillo
Espacio entre usillos	254 mm hasta 304 mm
Ajuste de husillos	Espaciado horizontal ajustado manualmente
Refrigerante	1 bomba por cada husillo, 15kW, 132 l/min Husillo
Procesado de viruta	Automático, 84 kg/hr de capacidad
Sistema CNC (Control numérico por computador)	CNC estándar

4.7 Cálculo de los parámetros de corte

4.7.1 Parámetros de corte

Figura 32 Parámetros de corte para taladrado BTA.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

En lo referente al cálculo de los datos de corte, el taladrado tiene muchas similitudes con el torneado y fresado. La velocidad de corte V_c es la diferencia de velocidad entre la periferia de la broca y la pared del agujero taladrado.

La profundidad de corte a_p se expresa en mm y se mide, al igual que en torneado, en la mitad del diámetro.

Velocidad de corte (m/min):

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{1000} = 80 \frac{m}{min}$$

Velocidad del husillo (r/min):

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D_c} = \frac{1000 \cdot 80}{\pi \cdot 20} = 1273.2395 \frac{mm}{min}$$

Velocidad del avance (mm/min):

$$V_f = f_n \cdot n = 0.18 \cdot 1273.2395 = 229{,}1831 \frac{mm}{min}$$

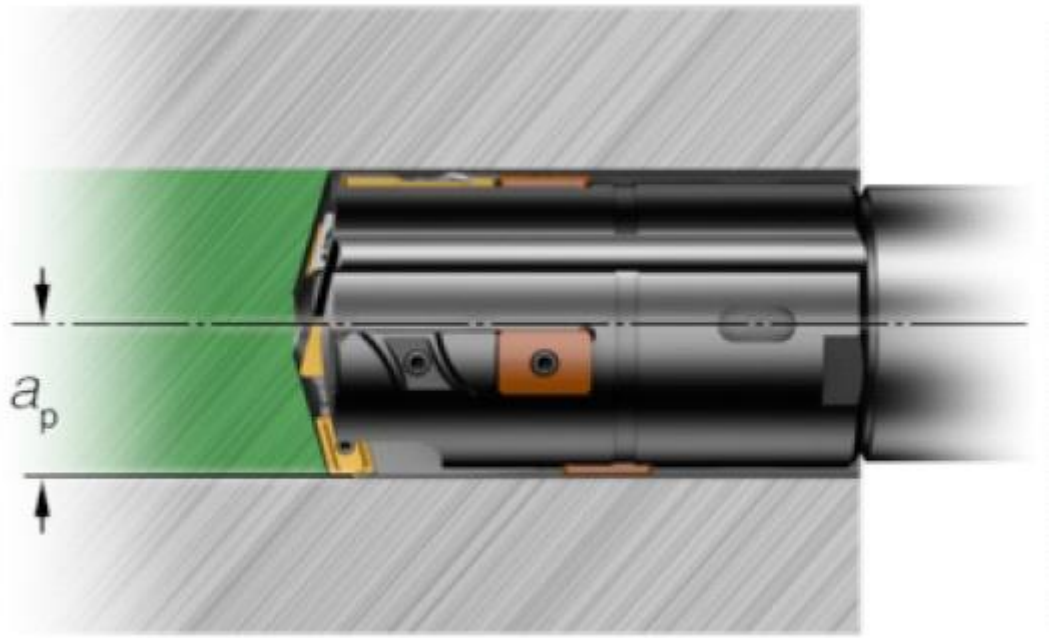
Terminología y unidades:

DC	Diámetro de taladrado	mm
a_p	Profundidad de corte	mm
v_c	Velocidad de corte	m/min
n	Velocidad del husillo	r/min
vf	Velocidad de avance	mm/min
f_n	Avance por rev.	mm/r

Q	Régimen de arranque de material	cm3/min
k_c	Fuerza de corte específica	N/mm
k_c 0.4	Fuerza de corte específica para f_z = 0.4	N/mm^2
Ff	Fuerza de avance	N
F_u	Fuerza de avance provocada por la fricción	N
M_c	Empuje	Nm
Mµ	Empuje provocado por la fricción	Nm
P_c	Potencia neta	kW
Pµ	Potencia provocada por la fricción	kW
KAPR	Ángulo del filo	Grados
q	Cantidad de refrigerante	l/min
p	Presión del refrigerante	Mpa

Diferentes valores de la profundidad de corte dependiendo del método de mecanizado utilizado.

Figura 33 Profundidad de corte en taladro enterizo



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

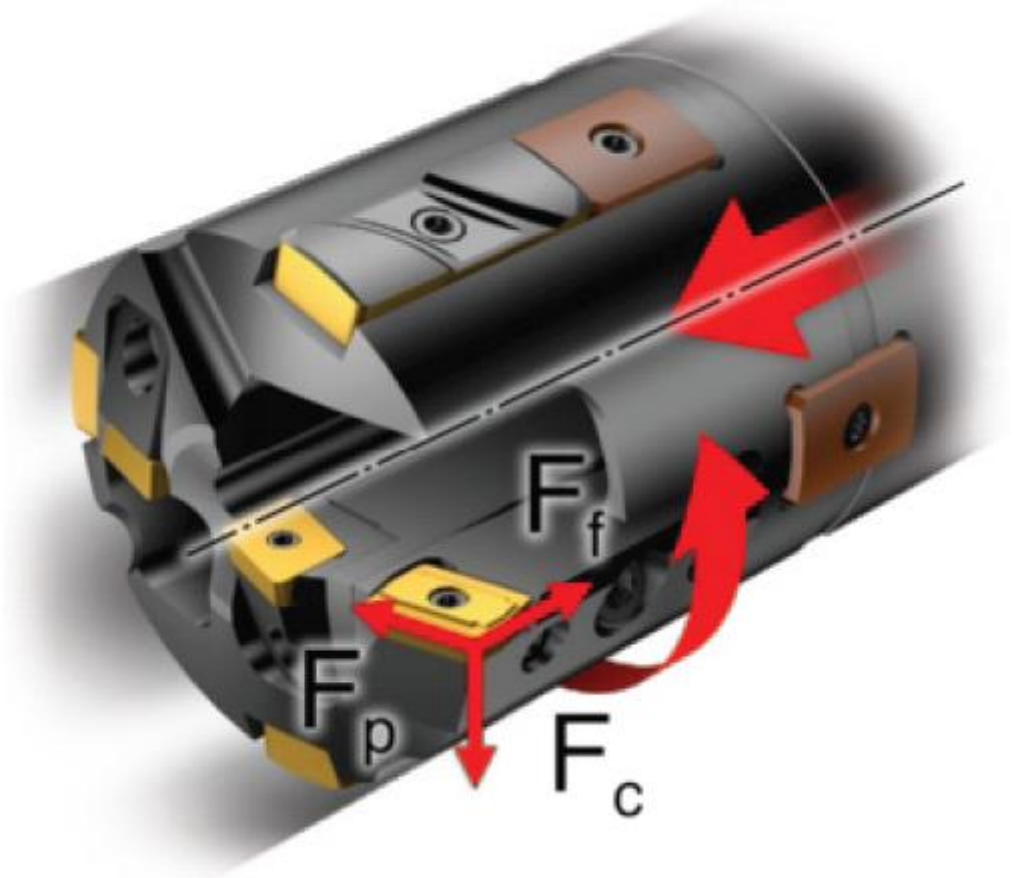
4.7.2 Fuerzas de corte y potencia de corte

Las fuerzas de corte que se producen durante el taladrado aparecen ilustradas en la siguiente figura. La fuerza axial, F_f, genera una fuerza de avance opuesta. La fuerza de corte tangencial, F_c, genera el empuje. M_c, y F_p es la fuerza radial que actúa sobre los patines guía. Las fuerzas de

corte pueden determinarse de forma experimental. Si se conoce la fuerza de corte específica k_c (N/mm^2) del material, puede calcularse el volumen de las fuerzas de corte.

Calcular con precisión la fuerza de corte específica y el coeficiente de fricción para los patines guía es complicado. Las fórmulas para la fuerza de avance, el empuje y el requisito de potencia son por tanto aproximadas.

Figura 34 Esquema de fuerzas en la herramienta.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Requisitos de potencia (P_cKW):

$$P_c + P_\mu = \frac{f_n \cdot V_c \cdot DC \cdot K_{cfz}}{240 \cdot 10^3} \cdot 1.34 = \frac{0.18 \cdot 80 \cdot 20 \cdot 1900}{240 \cdot 10^3} \cdot 1.34 = 3{,}055\ KW$$

Nota:

Estas fórmulas ofrecen el requisito de potencia neta en la punta del filo de corte, pero las pérdidas de potencia de la máquina no están incluidas en el cálculo. Aquí debe incluirse la fuerza de avance, el empuje y la potencia a velocidad de ralentí. El requisito de potencia debe calcularse basándose en una herramienta nueva. Para una herramienta con desgaste normal, el requisito de potencia es un 10-30% superior, en función del tamaño de la broca.

4.8 Disposición de los taladrados

En el taladrado de la placa tubular las perforaciones se realizan de manera continuada, sustituyendo las brocas cuando éstas llevan a cabo 15 perforaciones (para mantener la calidad superficial de los agujeros).

Durante la maniobra de cambio de herramientas, se llevan a cabo también controles en las perforaciones anteriores.

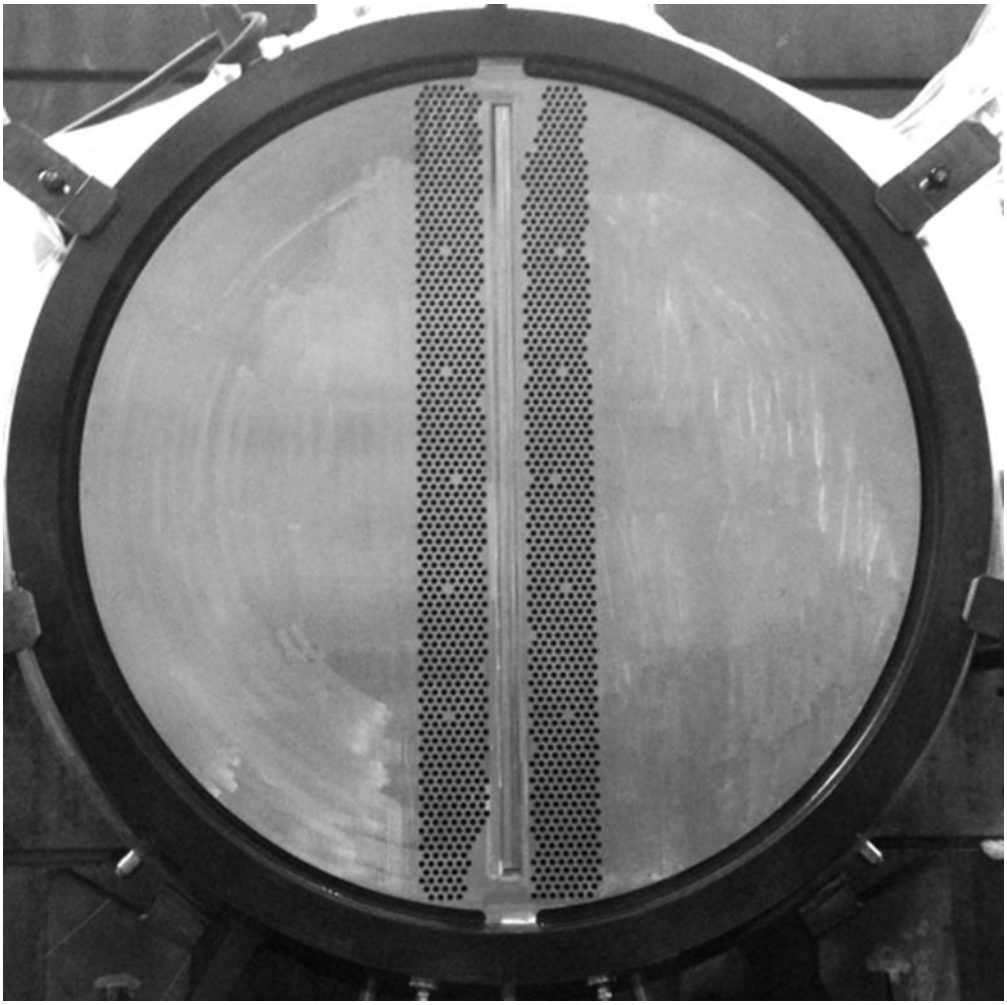
Se realizan controles visuales y pasa-no pasa, que garantizan que se cumplen los requerimientos dimensionales.

No es necesario comprobar la rugosidad superficial, puesto que al realizar un numero bajo de perforaciones cada herramienta, la calidad superficial de los agujeros está garantizada.

La posición de los agujeros viene determinada por el diseño del generador.

En general, los generadores actuales, tienen en su interior alrededor de 5000 tubos, lo que se traduce en una placa tubular perforada 10000 veces.

Figura 35 Taladrado de placa tubular.



Fuente: www.tarus.com.

4.9 Controles de calidad

Los principales controles que se llevan a cabo del proceso de taladrado se enumeran a continuación:

1. Chaflanes/radios del secundario.
2. Diámetro.
3. Espesor de la placa tubular.
4. Distancia entre ejes de los agujeros por el primario.
5. Examen visual.
6. Perpendicularidad.

4.9.1 Chaflanes/radios por el secundario

Se realizarán comprobaciones visuales y táctiles de que se han matado las aristas de todos los agujeros para eliminar muescas y rebabas.
Verificación del paralelismo de los agujeros.

4.9.2 Diámetro de agujeros taladrados

Se utiliza un pasa no-pasa calibrado con el diámetro que deben tener los agujeros taladrados (20 milímetros, con una tolerancia de ±0,05 milímetros), debe atravesar todo el largo del agujero en todos los agujeros de la placa y así verificar que cumplen los requerimientos de fabricación.

4.9.3 Espesor de la placa tubo

Se realizarán comprobaciones también el espesor real de la placa
Para ello se seleccionará una cuadrícula de 20 x 20 agujeros. Si el espesor medido en alguna zona varía en más de 0,5 milímetros en la banda de tolerancia, reducir la cuadrícula a 10 x 10 agujeros.

4.9.4 Distancia entre ejes de agujeros en el lado primario

1.- Entre agujeros adyacentes

Inspeccionar al 100 %: usar un calibre especial pasa no-pasa para ligamentos. Calcular las tolerancias del calibre de forma que dé la distancia entre agujeros adyacentes solo en el caso de diámetros conformes.
En el caso de diámetros fuera de tolerancia, medir las distancias con los 4 agujeros adyacentes.

2.- Entre agujeros no adyacentes

Se tomarán al menos 5 tipos de distancias diferentes (de hasta aproximadamente 2000mm), realizando al menos por cada una de ellas 5 medidas verticales (perpendiculares al talón de partición, algunas de ellas cruzando el eje del talón de partición) y 5 horizontales (paralelas al talón de partición), repartidas homogéneamente por toda la placa tubo.

4.9.5 Examen visual de los agujeros

Definición de los defectos típicos:

- Rayón circular: Agrandamiento circular por una longitud menor de 3mm.
- Rayón helicoidal: Agrandamiento en forma de hélice.
- Rayón longitudinal: Agrandamiento a lo largo del agujero.
- Desgarro: Normalmente un defecto pequeño, producido por un defecto de la herramienta de corte o por una irregularidad del material que resulta en un defecto superficial.

4.9.6 Perpendicularidad del agujero

Se medirá en cinco agujeros, uno próximo a cada eje y próximo al centro, con láser-tracker. El método debe garantizar una precisión de 0,1mm como máximo.

4.10 Coste económico de la operación de mecanizado de la placa tubular

Para el cálculo de los costes, partimos de los siguientes datos de la operación de mecanizado de la placa tubular:

Diámetro de la broca	20	mm
Velocidad de corte	80	mm/min
Velocidad del husillo	1273	mm/min
Avance	0,18	mm/rev
Profundidad	600	mm
número de agujeros	10000	taladrados

El posicionado de la máquina se realiza cada cinco perforaciones dado que la máquina dispone de cinco husillos.

Los controles se realizan cada 500 taladros y tienen una duración aproximada de 3 horas.

Para un coste de taller de 100€/hora:

Tiempo de taladrado:

Tc(min) : Tiempo de proceso

Id(mm) : Profundidad de agujero de taladro

fr(mm/rev) : Cantidad de alimentación de cada extensión

Velocidad del husillo:

$$n = \frac{V_c(\frac{m}{min}) \cdot 1000(\frac{mm}{m})}{D_c(mm) \cdot \pi} = \frac{80 \cdot 1000}{20 \cdot \pi} = 1273 min^{-1}$$

Tiempo de corte:

$$T_c = \frac{e(mm)}{n \cdot F_n(\frac{mm}{rev})} = \frac{600}{1273 \cdot 0.18} = 2{,}6184\ min$$

La máquina realiza los taladrados de cinco en cinco, entonces, se realizarán 2000 operaciones, con un tiempo total de taladrado de:

$$T_c = \frac{2.6184}{60} \cdot 2000 = 87{,}282\ horas$$

Parámetros de tiempo:

Tiempo de taladrado	0,04364	horas
Tiempo de taladrado total	87,282	horas
Tiempo de posicionado de la pieza	72	horas
Tiempo de calibrado de la máquina	4	horas
Tiempo de posicionado entre taladros	0,01	horas
Tiempo de posicionado total	20	horas
Brocas necesarias para el taladrado	667	Brocas
Tiempo de cambio de broca	0.017	horas
Tiempo de cambios de broca total	12	horas
Tiempo de controles	12	horas
Controles finales	48	horas
Tiempo total	255,282	horas

Coste total:

$$Coste = Tiempo\ total \cdot Coste\ horas\ taller = 255{,}282 horas \cdot 100 \frac{€}{hora} = 25528\ €$$

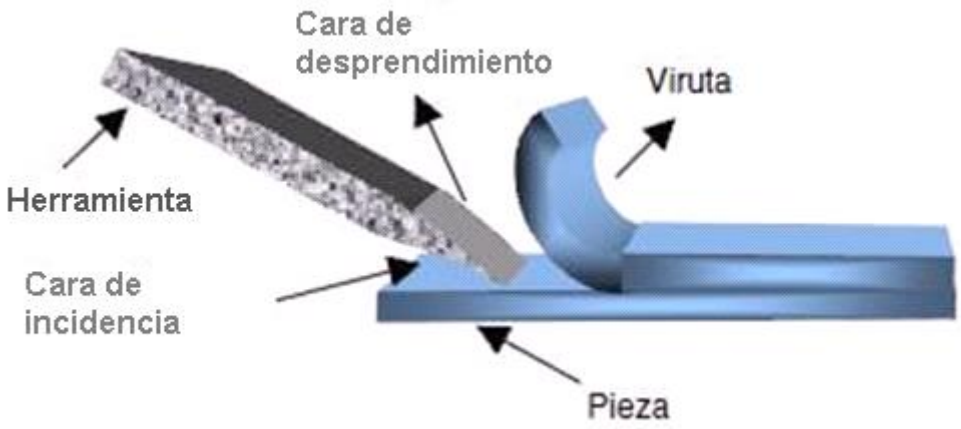
5 Control de la herramienta tras su vida de corte. Observación de la viruta.

Al comenzar el proceso de corte se controla una herramienta tomada al azar para ver que tipo de daño presenta tras su vida de corte.

5.1 Teoría del corte. Desgaste de la herramienta

El material es arrancado o cortado con una herramienta dando lugar a un desperdicio o viruta. La herramienta consta, de varios filos o cuchillas que separan la viruta de la pieza en cada pasada. En el mecanizado por arranque de viruta se dan procesos de desbaste (eliminación de mucho material con poca precisión; proceso intermedio) y de acabado (eliminación de poco material con mucha precisión; proceso final cuyo objetivo es el de dar el acabado superficial que se requiera a las distintas superficies de la pieza).

Figura 36 Esquema del mecanismo de corte de la herramienta



Fuente: grupocarman.com

Principales mecanismos de desgaste de la herramienta:

- Desgaste por abrasión.
- Filo superpuesto.
- Oxidación.
- Fatiga.

5.2 Tipos de daños que puede sufrir la herramienta

5.2.1 Desgaste en flanco

Ilustración 25 Desgaste de flanco

Fuente: www.sandvik.com

El desgaste en incidencia es el tipo de desgaste preferible si está equilibrado. El desgaste en incidencia puede producir:

- Acabado superficial deficiente.
- Tolerancia del agujero fuera del intervalo normal.
- Aumento de la potencia.

Causa

1. Velocidad de corte demasiado alta (vc).
2. Resistencia al desgaste insuficiente de la calidad.

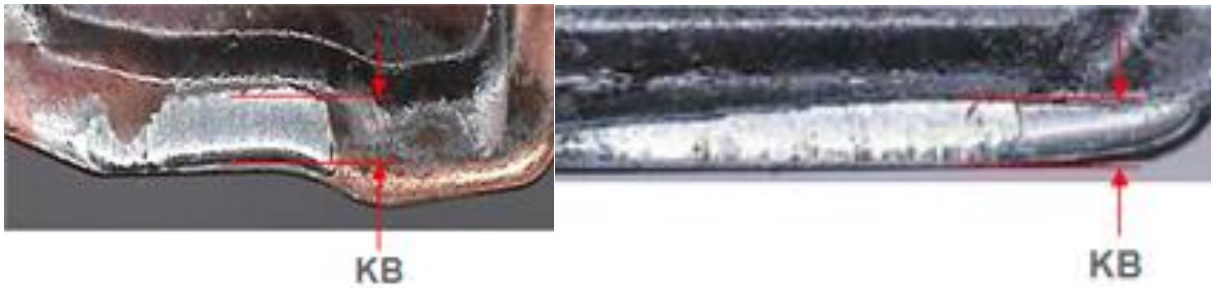
Acción

1. Reducir la velocidad de corte (vc).
2. Seleccionar una calidad con mayor resistencia al desgaste.

5.2.2 Desgaste en cráter

Ilustración 26 Desgaste de cráter

Plaquita central **Plaquita periférica**



Fuente: www.sandvik.com

El desgaste en cráter puede producir:

- Un filo de corte débil que puede ocasionar la rotura del filo y generar una viruta deficiente.
- Acabado superficial deficiente.
- Aumento de la potencia.

Causa

Plaquita central: Viruta abrasiva (material de la pieza).

Plaquita periférica: Desgaste de difusión ocasionado por una temperatura elevada.

Acción

Plaquita central: Reducir el avance.

Plaquita periférica:

1. Reducir la velocidad de corte.
2. Seleccionar una calidad más resistente al desgaste.

Acción general

Seleccionar una geometría más positiva para una mejor formación de viruta.

5.2.3 Filo superpuesto

Ilustración 27 Filo superpuesto

Fuente: www.sandvik.com

El filo superpuesto, es el mecanismo de fallo más común, dado la tendencia que tienen los aceros de baja aleación (que es el acero que mecanizamos) a producirlo.

El filo de aportación puede producir:

- Acabado superficial pobre y roturas del filo cuando el filo superpuesto es arrancado por la viruta.
- Astillamiento del filo.

Causa

1. Temperatura desfavorable (velocidad de corte baja).
2. Geometría de corte demasiado negativa.
3. Pieza de metal dúctil (acero inoxidable austenítico, etc.).
4. Mezcla de aceite demasiado baja en el líquido de corte.

Acción

1. Aumentar la velocidad de corte (temperatura alta).
2. Seleccionar una calidad con recubrimiento.
3. Seleccionar una geometría más positiva.
4. Aumentar la mezcla de aceite y el volumen/presión del refrigerante.

5.3 Control del daño en nuestra herramienta

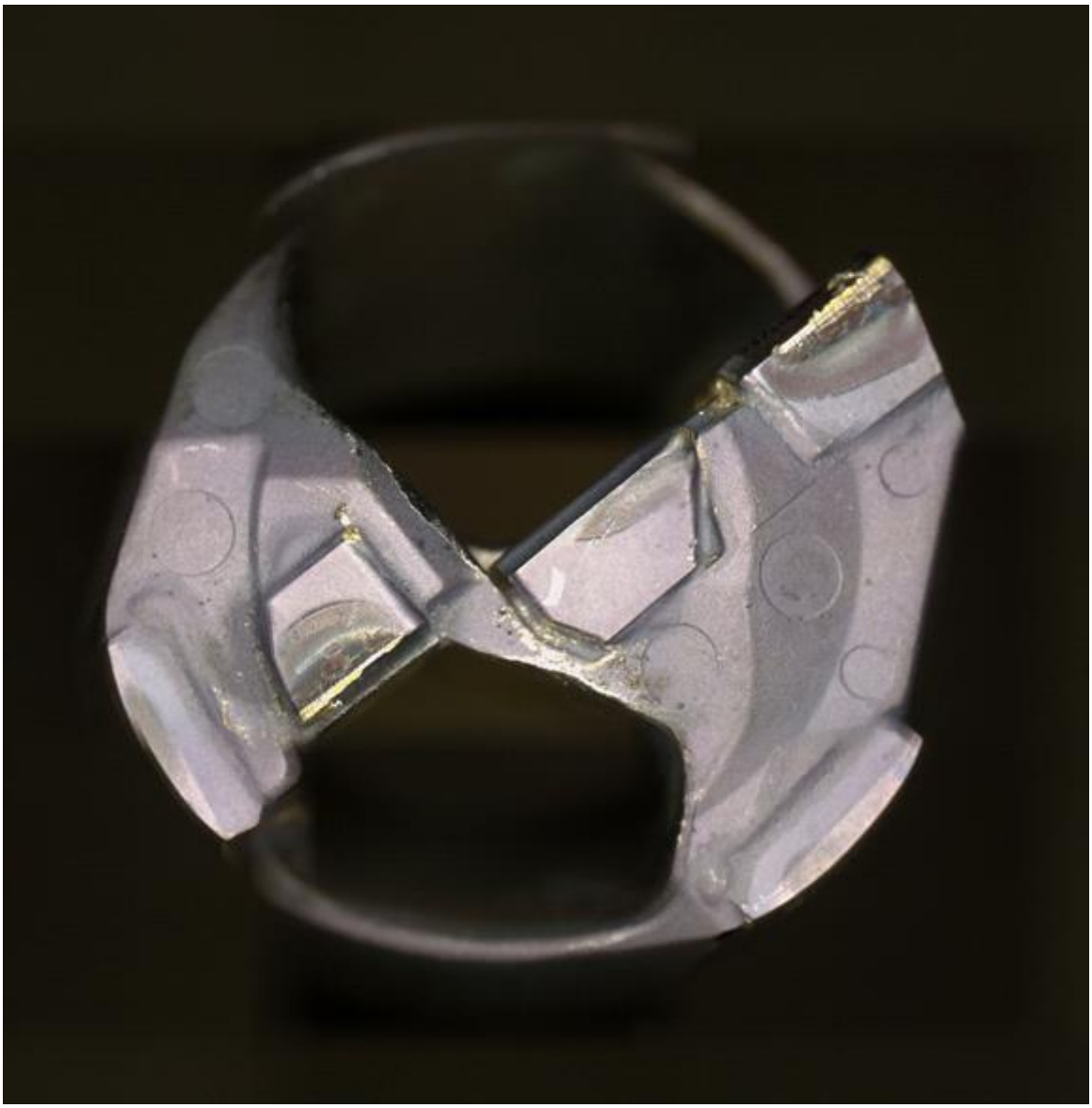
5.3.1 Observación de los filos

En este apartado se analizarán los filos de las plaquitas de la herramienta mediante un microanálisis de rayos X, que determinará los materiales presentes en la misma.

La herramienta que se ha utilizado para perforar la placa tubular dispone de tres plaquitas de corte que corresponden a los filos, central, intermedio y periférico.

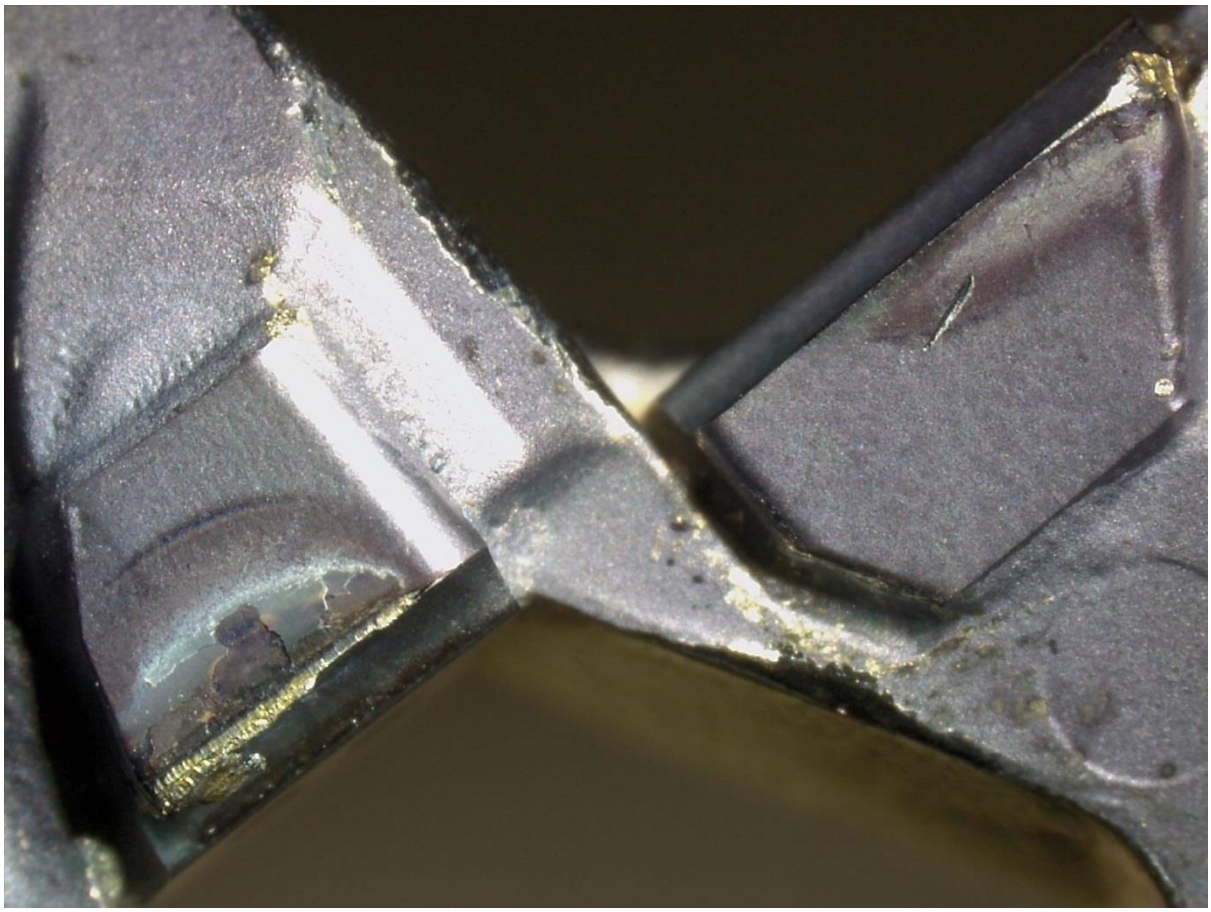
En la siguiente imagen podemos ver la herramienta que se va a analizar y las tres plaquitas soldadas (mediante soldadura fuerte) a la herramienta.

Ilustración 28 Filos de la herramienta. Diámetro de la broca 20 mm



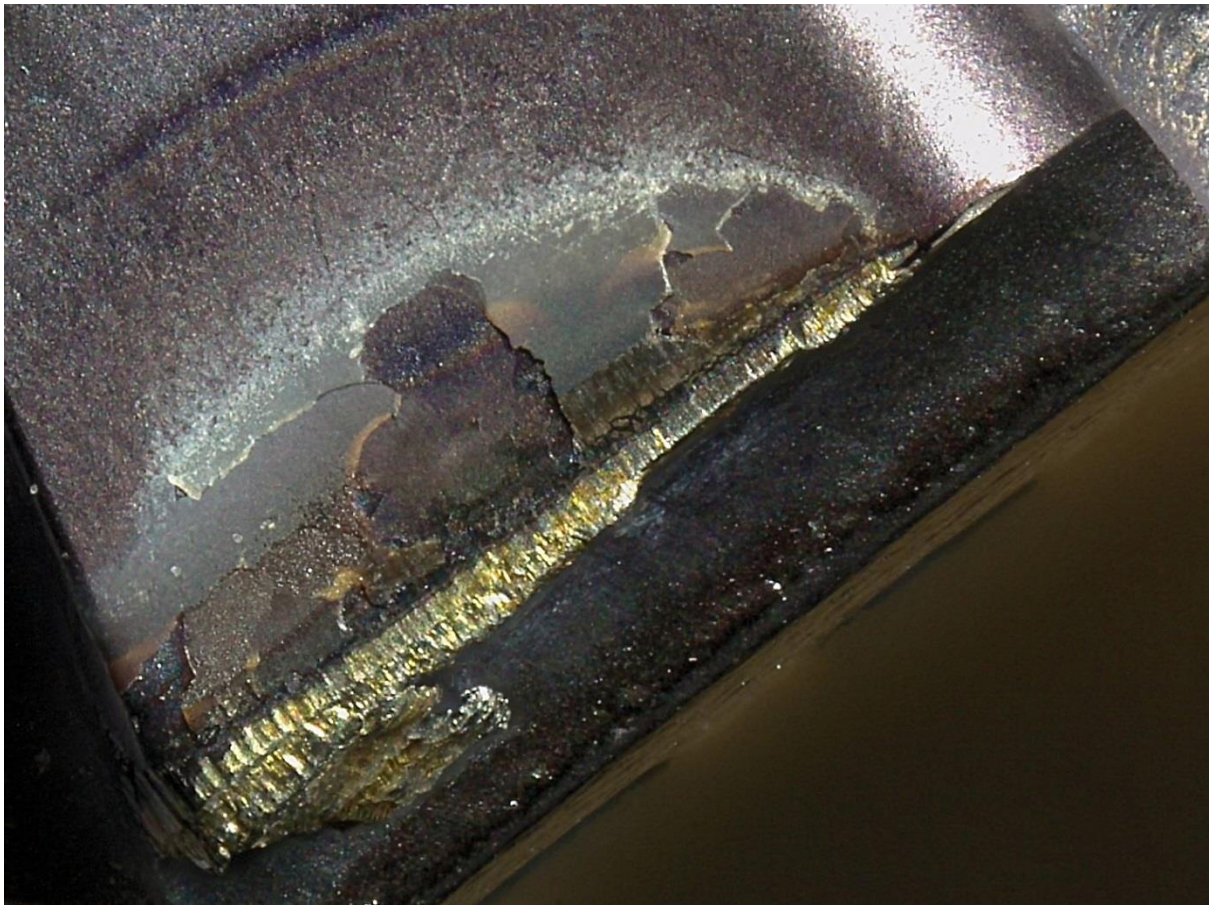
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 29 Filos central e intermedio de la herramienta muestra.



Fuente: Elaboración propia.

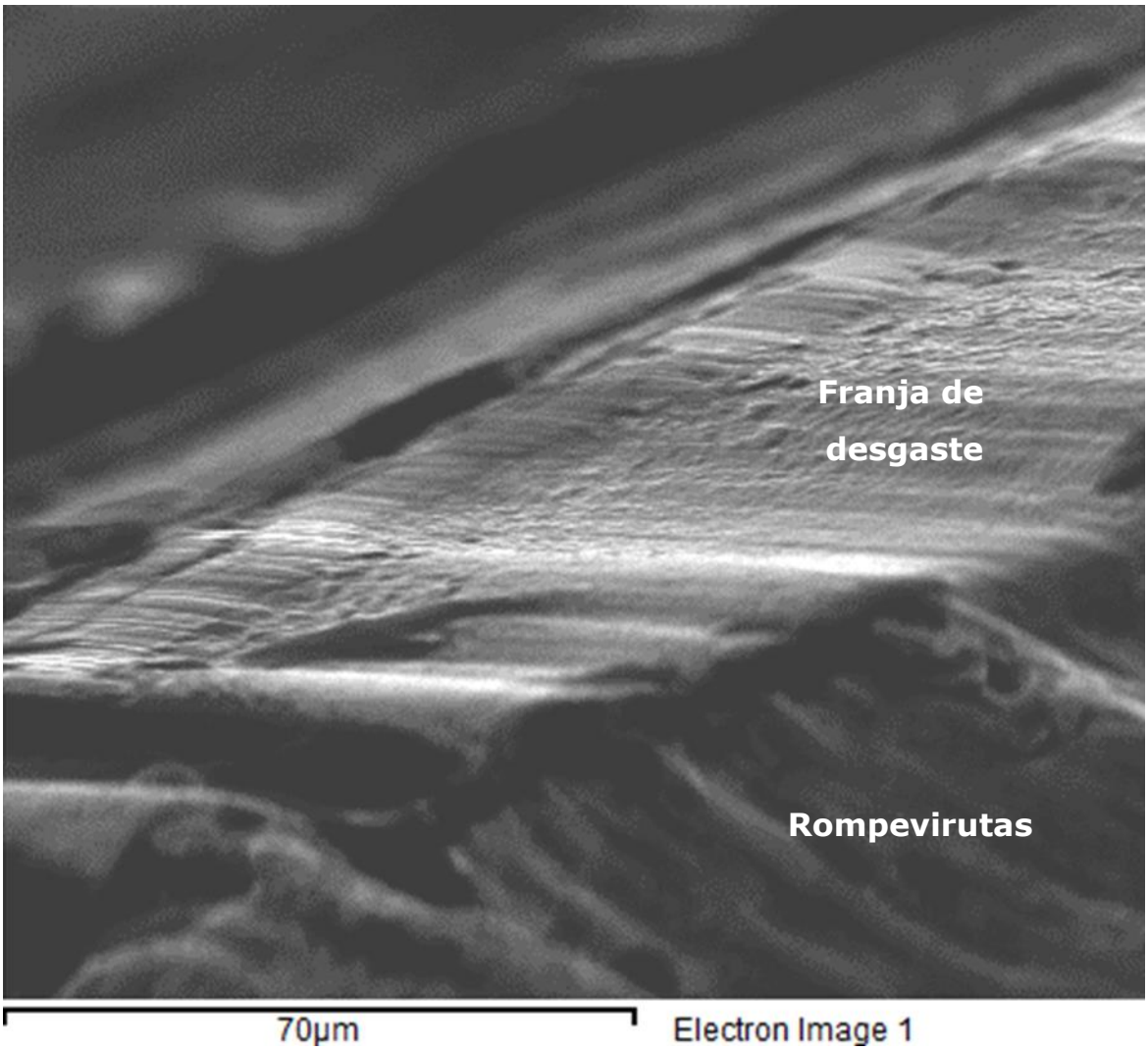
Ilustración 30 Detalle de la zona del filo de la herramienta



Fuente: Elaboración propia

Ha continuación podemos ver en la siguiente imagen, obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido, un detalle del filo de la plaquita periférica:

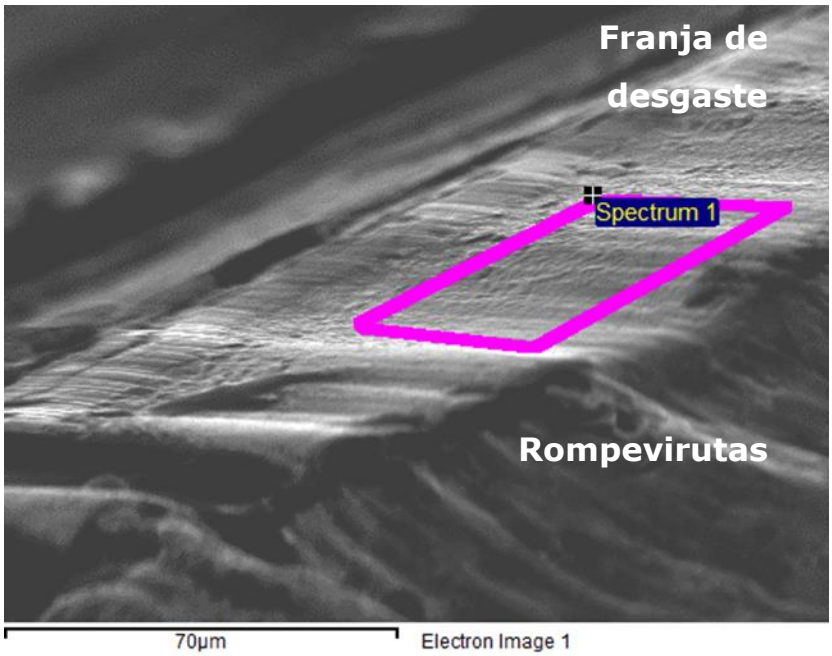
Ilustración 31 Detalle al microscopio electrónico de barrido de la franja de desgaste (cara de incidencia) de la plaquita periférica.



Fuente: Elaboración propia.

Analizamos a continuación mediante Microanálisis por rayos X, los porcentajes de los materiales presentes en esta zona del filo:

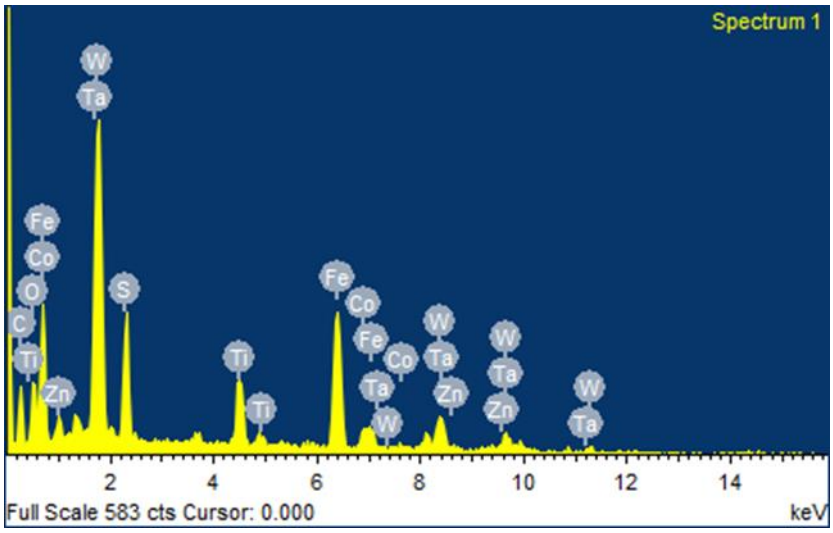
Ilustración 32 Franja de desgaste analizada de la plaquita periférica.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados del microanálisis:

Figura 37 Microanálisis por rayos X (EDX) de la franja de desgaste de la plaquita periférica.



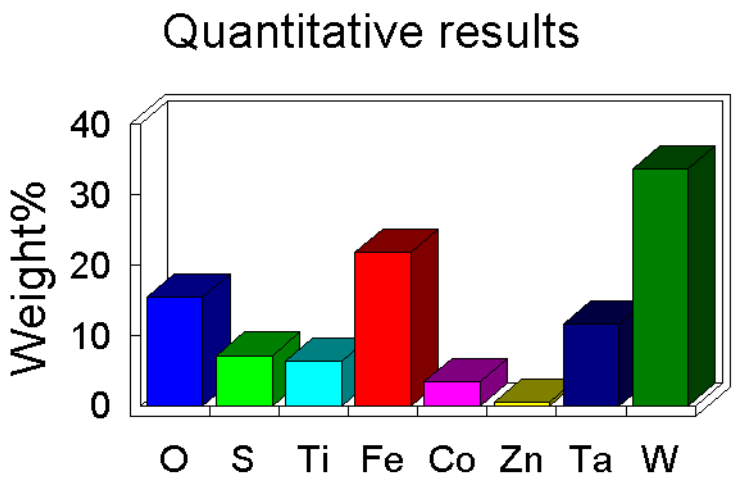
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10 Microanálisis de la franja de desgaste en la plaquita periférica.

Element	Weight%	Atomic%
O K	15.41	47.60
S K	7.18	11.07
Ti K	6.30	6.50
Fe K	21.86	19.34
Co K	3.39	2.84
Zn K	0.56	0.42
Ta M	11.57	3.16
W M	33.72	9.06

Fuente: Elaboración propia.

Figura 38 Gráfico de los resultados de la Tabla 10.



Fuente: Elaboración propia.

En los resultados observamos la presencia de Oxígeno (O), debido a las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso de corte.

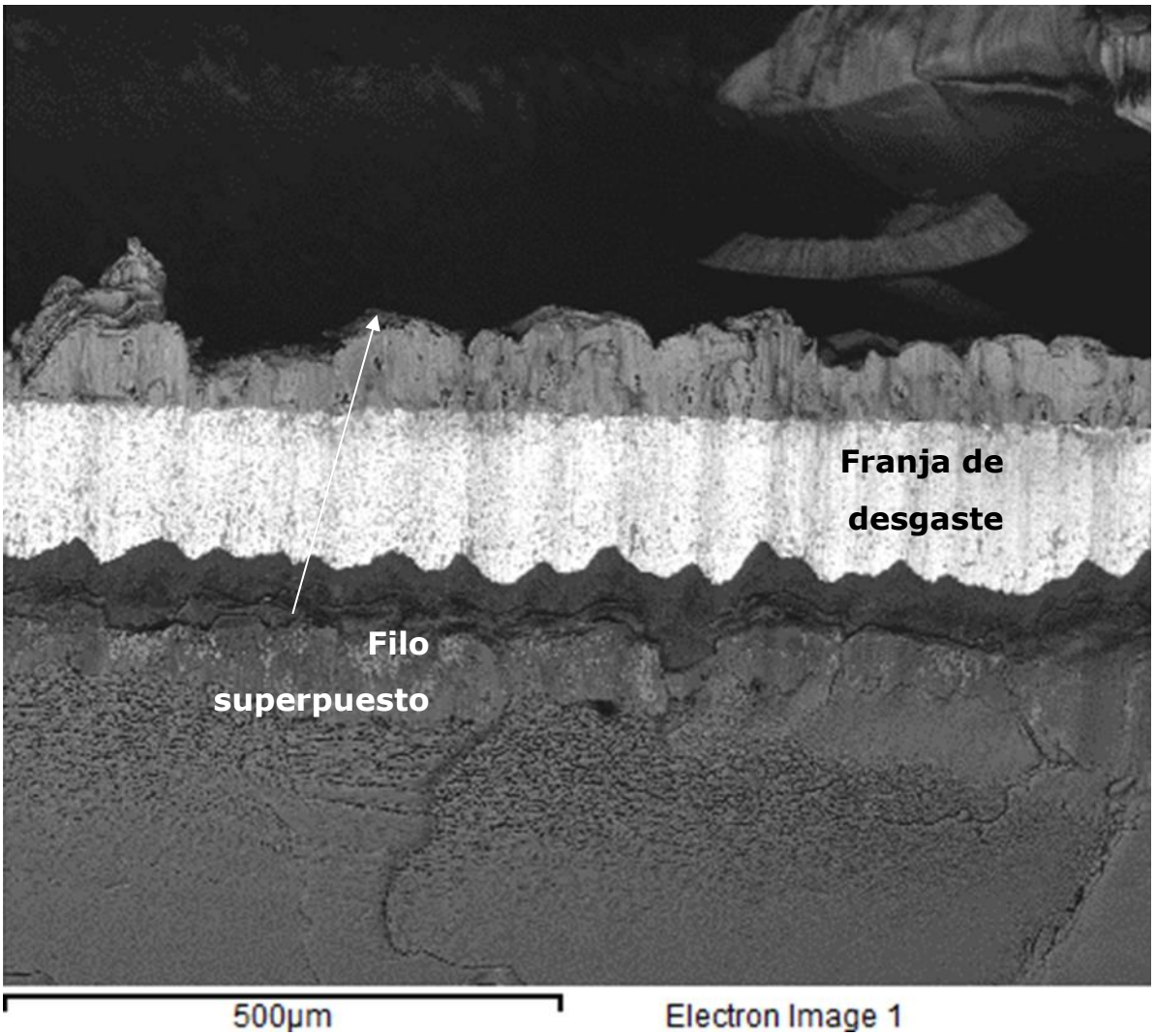
Aparecen también Azufre (S) y Zinc (Zn), que pertenecen al fluido de corte utilizado para la operación de mecanizado. Se trata de elementos presentes en los aditivos de extrema presión.

En cuanto a la presencia de Cobalto (Co), Tántalo (Ta) y Wolframio (W), se trata de los elementos del metal duro.

En cuanto al Hierro (Fe) se debe a la viruta que queda adherida en la herramienta. Nos indica que, como sabemos, ha mecanizado acero.

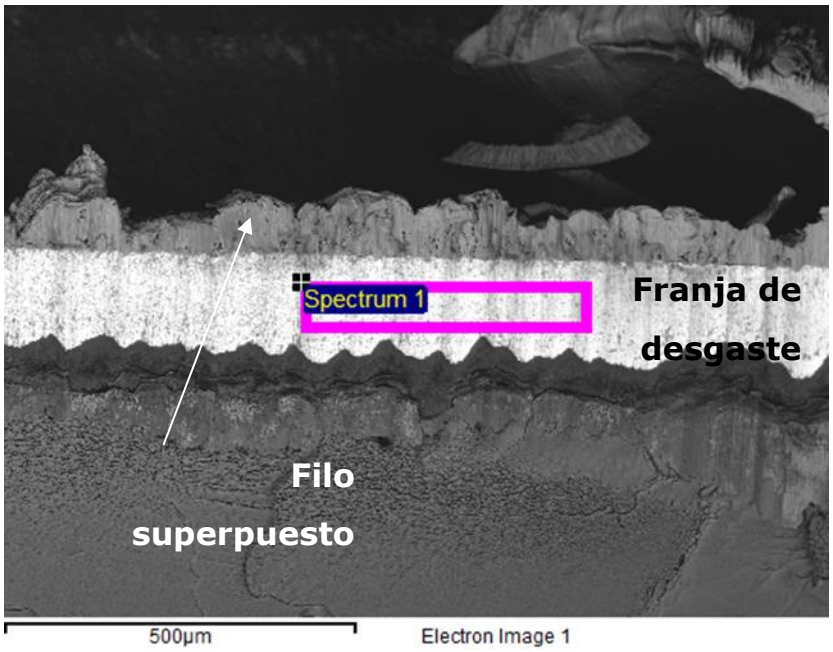
Realizamos a continuación el mismo microanálisis pero de la plaquita central:

Ilustración 33 Franja de desgaste (cara de incidencia) de la plaquita central (microscopio electrónico de barrido). Obsérvese el filo superpuesto y la franja de desgaste, así como el daño por abrasión.



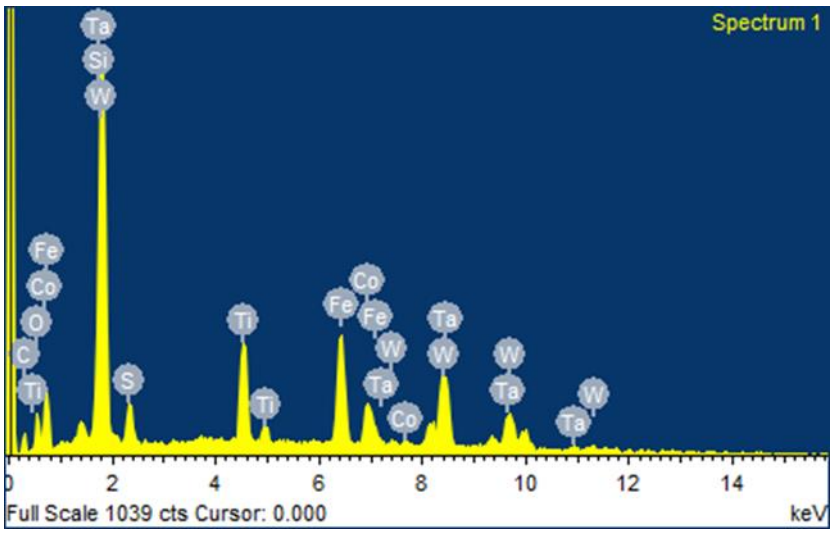
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 34 Zona analizada en la franja de desgaste de la plaquita central.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39 Microanálisis de la ilustración 28 y Tabla 11.



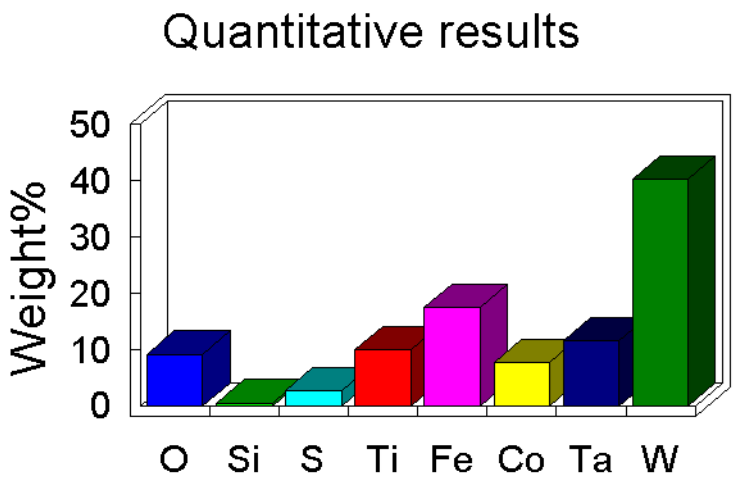
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11 Microanálisis de la franja de desgaste de la plaquita central.

Element	Weight%	Atomic%
O K	9.26	35.58
Si K	0.62	1.35
S K	2.82	5.40
Ti K	10.00	12.84
Fe K	17.61	19.38
Co K	7.67	8.00
Ta M	11.68	3.97
W M	40.33	13.48

Fuente: Elaboración propia.

Figura 40 Microanálisis de la ilustración 28 y Tabla 11.



Fuente: Elaboración propia.

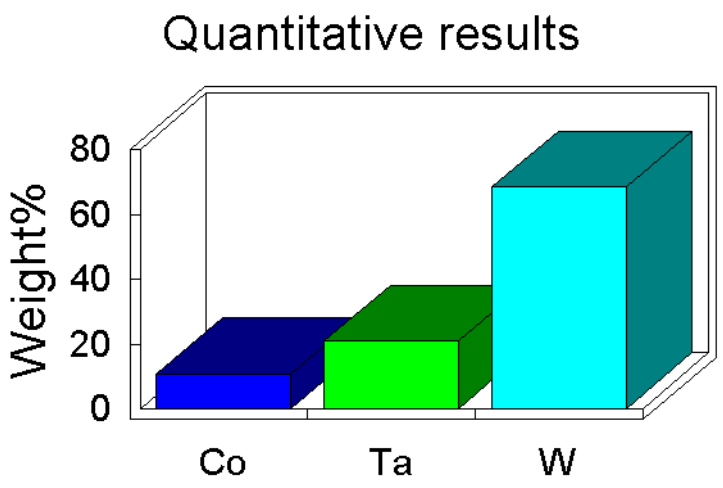
Dado que en el microanálisis han aparecido muchos elementos (que más adelante definiremos su origen) y puesto que del microanálisis anterior, hemos detectado como principales materiales de los que se compone el filo de la plaquita son Cobalto (Co), Tántalo (Ta) y Wolframio (W), aislamos los resultados para esos metales:

Tabla 12 Composición intrínseca del filo de la plaquita central (considérese que el análisis EDAX no cuantifica el carbono).

Element	Weight%	Atomic%
Co K	10.72	27.18
Ta M	20.82	17.19
W M	68.46	55.63

Fuente: Elaboración propia.

Figura 41 Gráfica correspondiente a la Tabla 12.



Fuente: Elaboración propia.

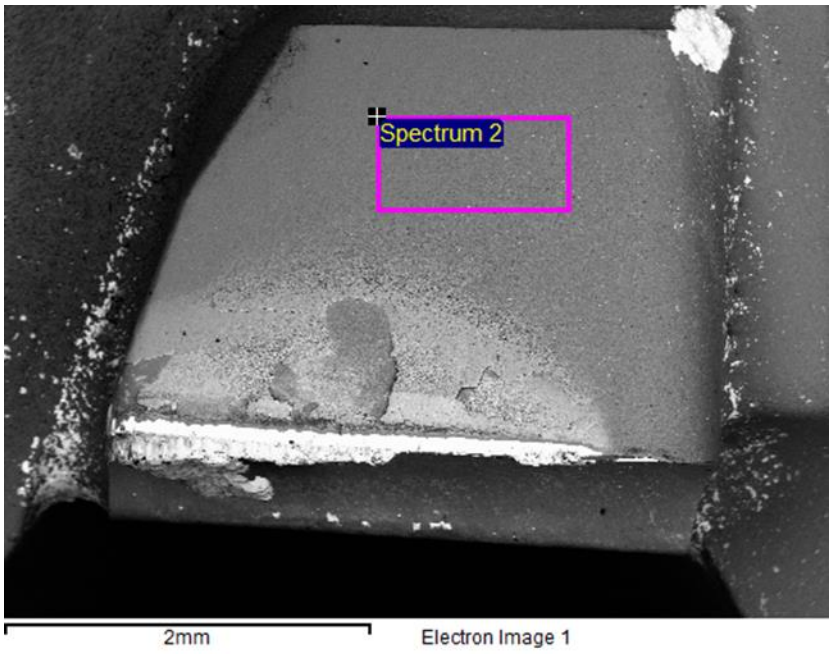
Podemos observar que los materiales de los que se componen los filos de las plaquitas son principalmente Wolframio (W) 68,46%, Tántalo (Ta) 20,82% y Cobalto (Co) 10,72% así como el carbono que no se detecta en este análisis y que forma los duros carburos de wolframio y Tántalo.

5.3.2 Observación de su recubrimiento

Analizaremos ahora la composición del recubrimiento de las plaquitas de corte de la herramienta. Analizaremos una de las plaquitas de las tres presentes en la herramienta, puesto que la composición será la misma para todas.

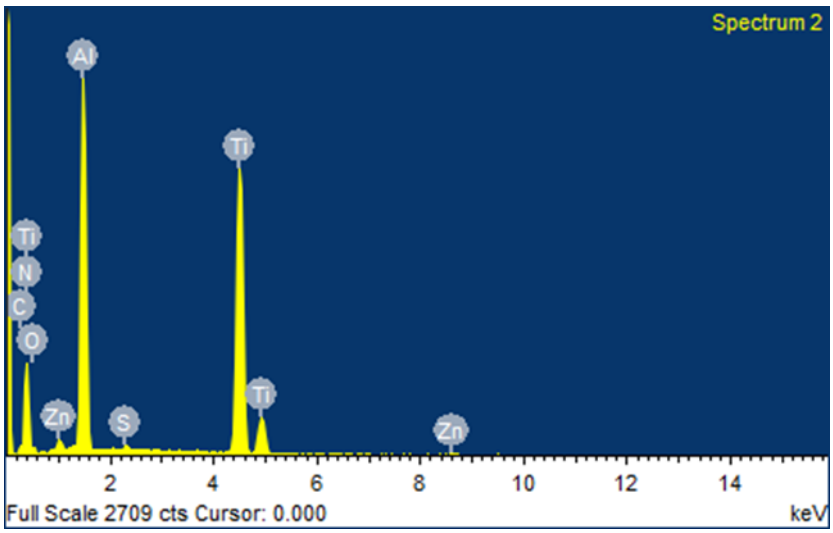
Vamos a analizar en concreto, la plaquita central.

Ilustración 35 Zona analizada del recubrimiento de la plaquita central.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42 Análisis EDAX del recubrimiento de la plaquita central.



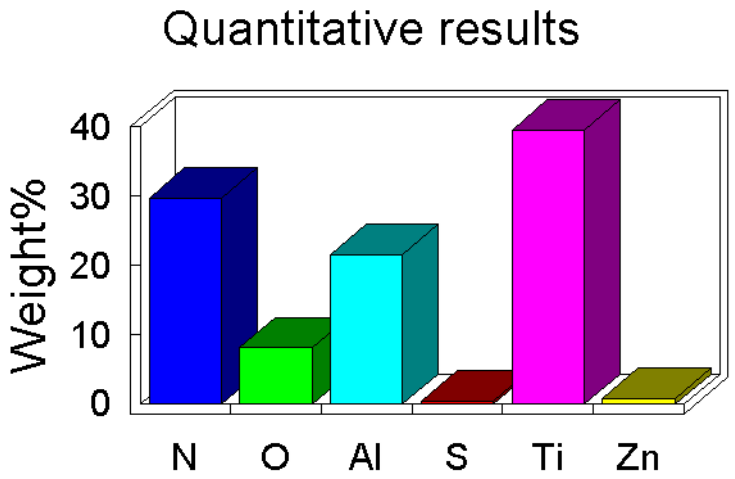
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Tabla de resultados del microanálisis de la plaquita central.

Element	Weight%	Atomic%
N K	29.74	49.66
O K	8.12	11.87
Al K	21.50	18.64
S K	0.37	0.27
Ti K	39.50	19.29
Zn K	0.79	0.28

Fuente: Elaboración propia.

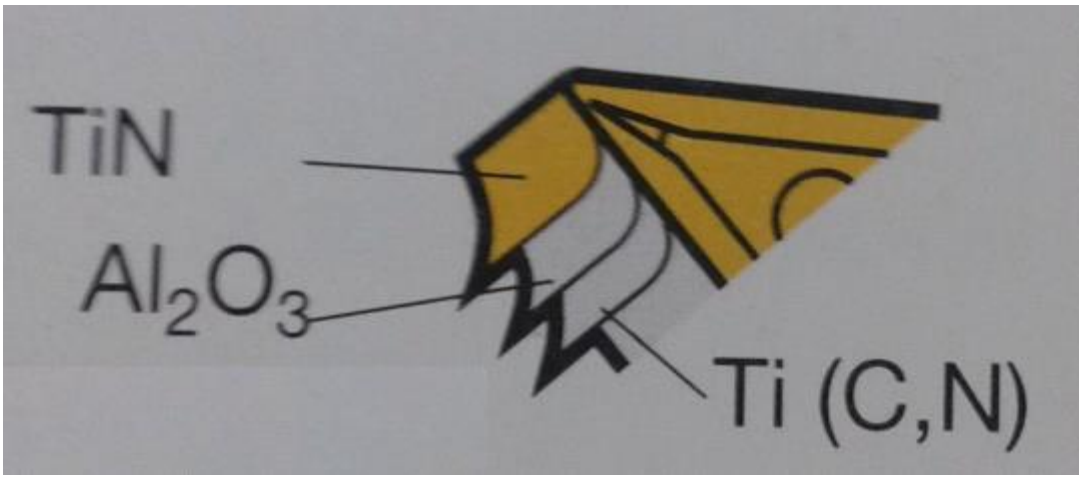
Figura 43 Análisis del recubrimiento de la plaquita central.



Fuente: Elaboración propia.

Como era previsible, el recubrimiento de las plaquitas están compuestas por una capa exterior de nitruro de titanio (TiN, que le da su característico color amarillo) tan fina que los rayos X la atraviesan y, llegando a otra capa más profunda de alúmina (Al_2O_3) detectan a su aluminio. La capa de TiN ayuda a minorar el filo superpuesto, mientras que la alúmina aísla térmicamente a la plaquita del calor producido en el corte.

Figura 44 Esquema de recubrimiento de las plaquitas de la herramienta.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

5.3.3 Observación de la soldadura fuerte de las plaquitas a la broca

La soldadura fuerte consiste en un proceso de unir dos metales a través de un decapado de éstos y la posterior adición de un metal de aportación fundido, el cual debe tener una temperatura de fusión superior a 450 °C y menor a la de los cuerpos a unir. Este material de aportación se colocará en el estrecho resquicio presente entre las dos partes a unir y penetrará allí por capilaridad. Este tipo de unión es muy común en la historia de la humanidad.

Fundamentos de la soldadura fuerte

Con el fin de obtener uniones soldadas de alta calidad, las piezas deben quedar adaptadas perfectamente, y los metales base deben estar limpios y libres de óxidos. En la mayoría de los casos se recomiendan dejar una distancia de entre 0,003 y 0,08 mm para lograr una mejor acción capilar. Sin embargo, en algunas operaciones de soldadura no es raro tener espacios comunes en torno a 0,6 mm. Como ya hemos dicho la limpieza de las superficies es de vital importancia, ya que cualquier contaminación puede provocar un resultado final negativo. Los dos métodos principales

para limpieza de piezas son de limpieza química y la limpieza con abrasivos o mecánica.

Otra consideración que no debemos saltarnos es el efecto de la temperatura y tiempo para una buena calidad. En general, la temperatura de soldadura elegida debe estar por encima del punto de fusión del metal de aporte. Para la elección de la temperatura consideraremos los factores siguientes:

(1) la temperatura más baja posible para poder soldar
(2) minimizar los efectos del calor en la unión
(3) mantener el metal de relleno
(4) maximizar la vida de la herramienta

La soldadura fuerte como bien indica su nombre se caracteriza por tener una fortaleza y ductilidad alta. De hecho la zona de unión es tan fuerte como los metales que se han unido. También es una unión que destaca por su homogeneidad en la unión, lo que implica un buen acabado a nivel estético y estanqueidad a la hora de contener fluidos.

Normalmente a este método se le llama también en los talleres soldadura plata porque el metal que se funde suele tener un contenido de este elemento junto con otros metales como cobre.

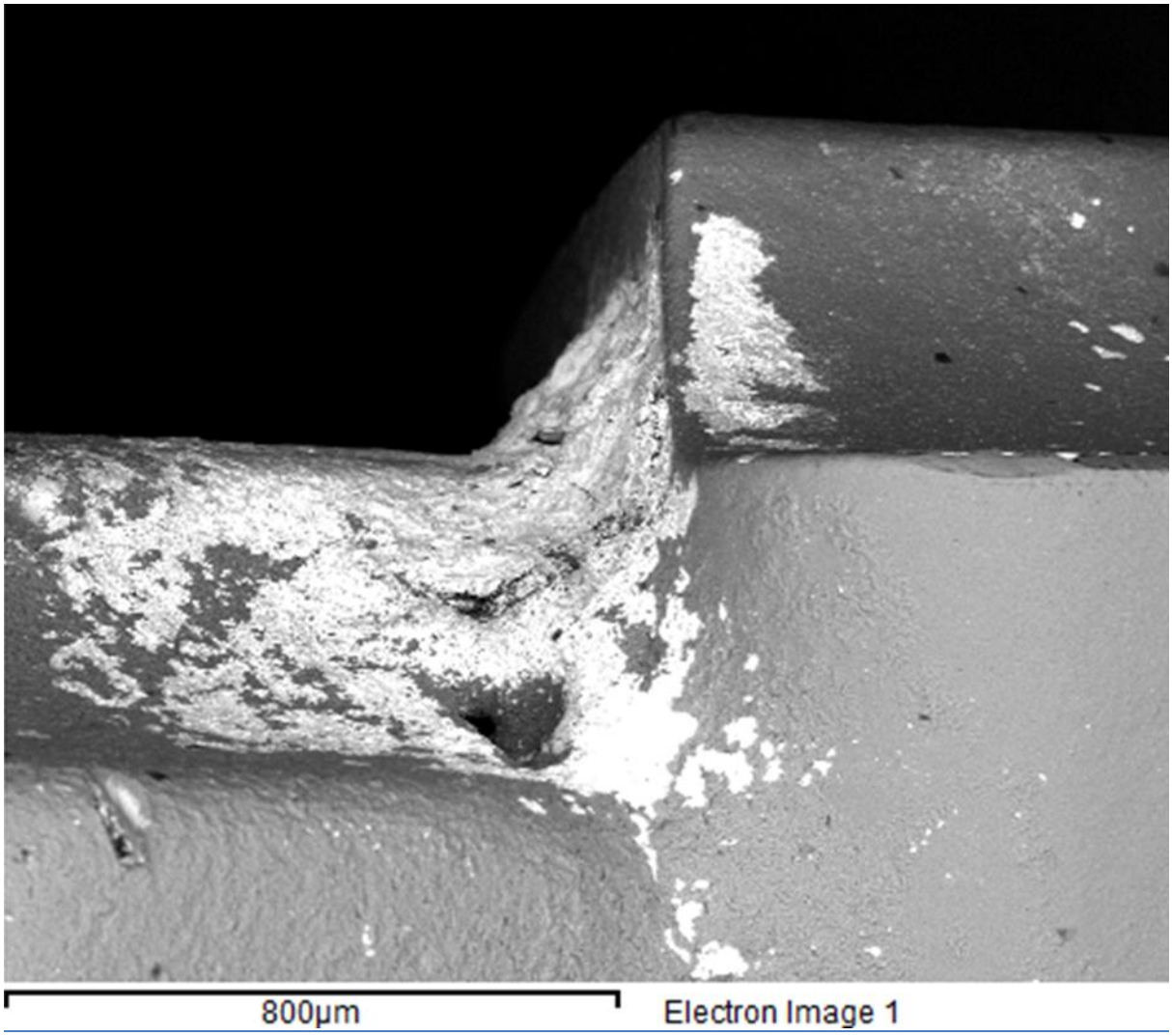
Soldadura plata

Este tipo de soldadura es utilizado principalmente en la industria de la herramienta donde se usa para unir puntas de metal duro como el carburo de tungsteno (TiC) a herramientas como sierras o taladros. Para ello se coloca la aleación de soldadura entre la pieza de metal duro y el acero para ser refundidos de nuevo.

Este tipo de soldadura sirve además como "amortiguador" entre la punta de metal duro y la herramienta de acero, lo que suaviza el impacto de la herramienta y el desgaste de la punta.

Análisis con microscopio electrónico de barrido de la zona de la soldadura de las plaquitas

Ilustración 36 Detalle al microscopio electrónico de barrido de la soldadura de las plaquitas de metal duro a la herramienta (zona central).

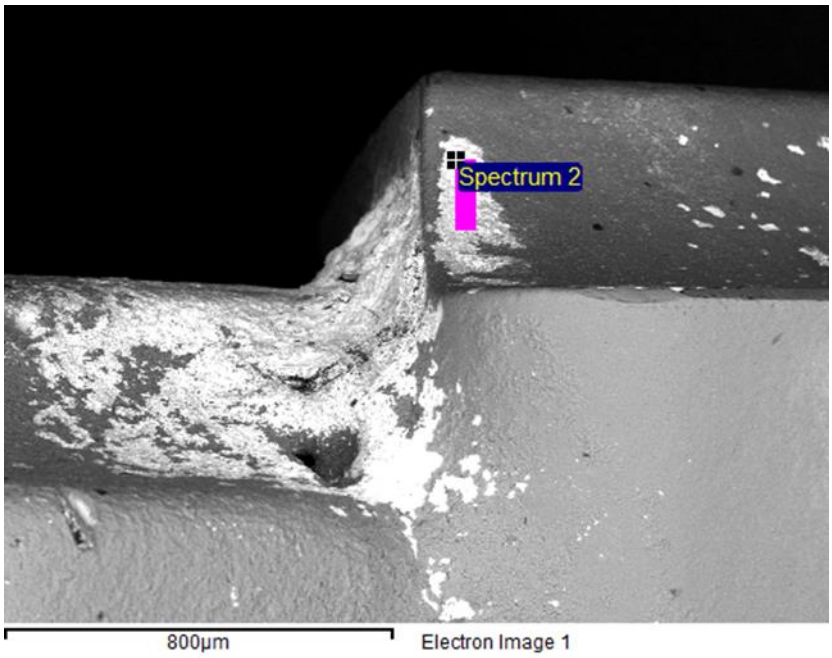


Fuente: Elaboración propia.

Para soldar las plaquitas, primero se aplica un decapante en la zona de unión (que eliminará los posibles óxidos de las piezas y garantizará el contacto entre ambas) y a continuación se lleva a cabo la soldadura fuerte.

Realizamos ahora un microanálisis por rayos X en la zona más accesible al detector donde hay metal de soldadura:

Ilustración 37 Zona analizada del metal de la soldadura de la plaquita central.



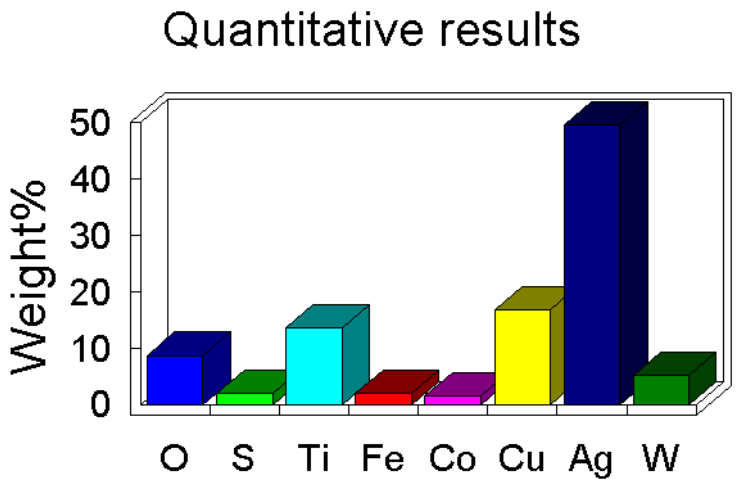
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14 Resultados obtenidos del microanálisis del metal de la soldadura de las plaquitas a la herramienta.

Element	Weight%	Atomic%
O K	8.73	31.81
S K	2.05	3.72
Ti K	13.75	16.74
Fe K	2.08	2.17
Co K	1.61	1.60
Cu K	16.77	15.39
Ag L	49.76	26.90
W M	5.25	1.67

Fuente: Elaboración propia.

Figura 45 Gráfico de resultados del microanálisis por rayos X del metal de soldadura de la plaquita central.

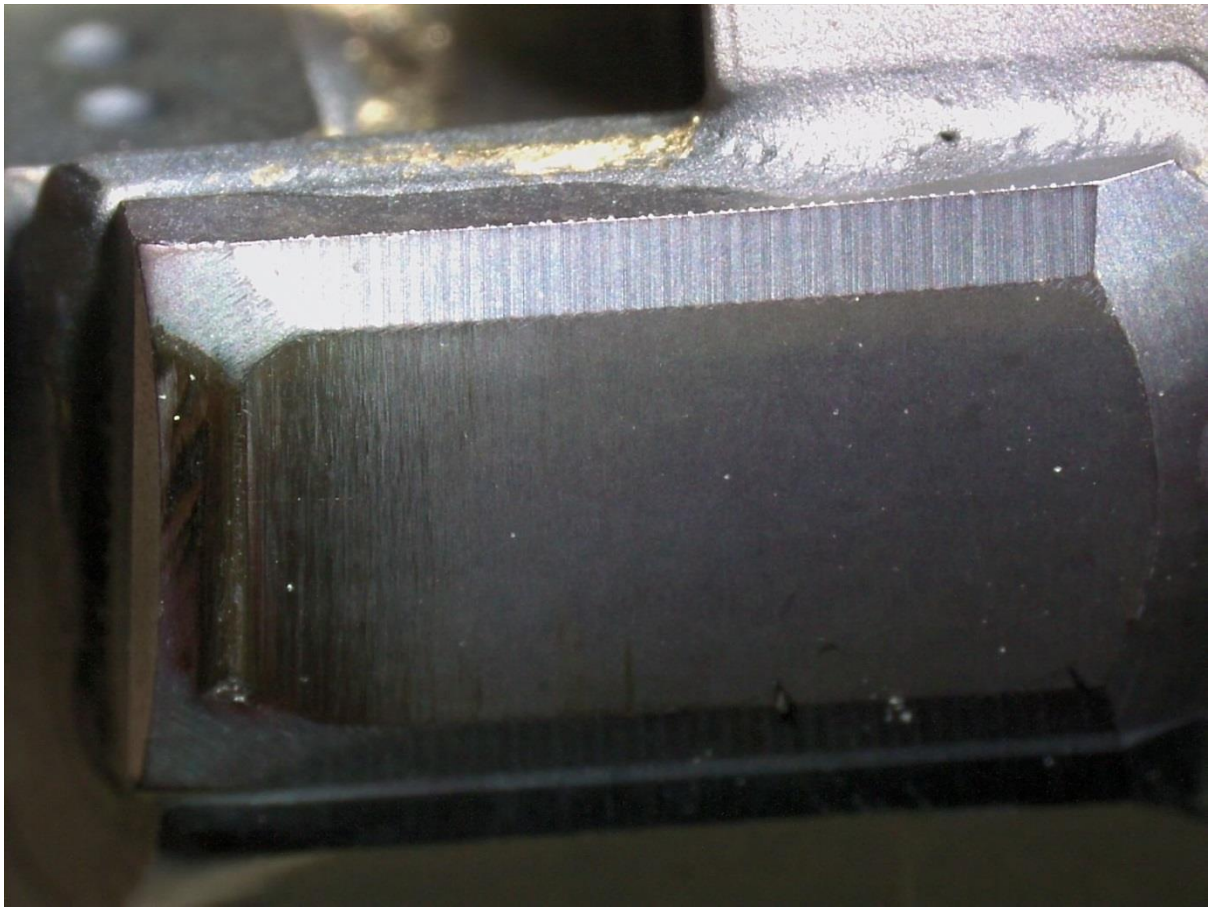


Fuente: Elaboración propia.

En los resultados podemos entre otros, que aparece la Plata (Ag), junto con el Cobre (Cu), principales materiales de la soldadura fuerte. El análisis detecta, por proximidad el wolframio y cobalto del metal duro y el Ti del recubrimiento así como el azufre del aceite de corte y el oxígeno por la oxidación a latas temperaturas.

5.3.4 Observación del patín de la herramienta

Ilustración 38 Patín de la herramienta.



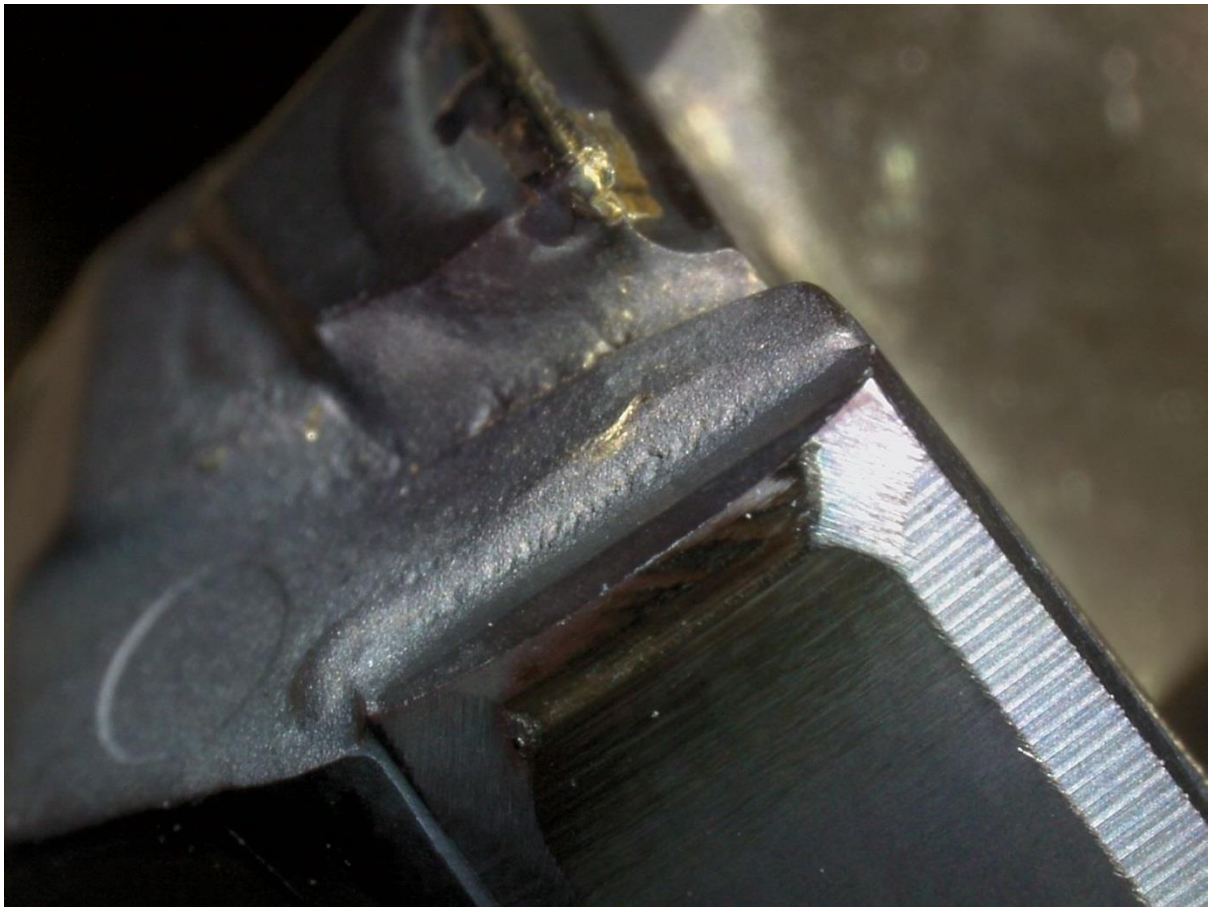
Fuente: Elaboración propia.

Debido a la elevada relación entre la profundidad y el diámetro del agujero y la precisión requerida, la broca debe contar con un soporte durante el proceso de mecanizado. Por este motivo, los patines guía del taladrado de agujeros profundos se utilizan no solo para equilibrar las fuerzas de corte sino también para guiar la broca hacia la superficie del agujero taladrado.

La broca comienza en un casquillo de broca cuya tarea es guiar y sostener la broca desde la penetración inicial hasta que los patines empujen contra la superficie taladrada.

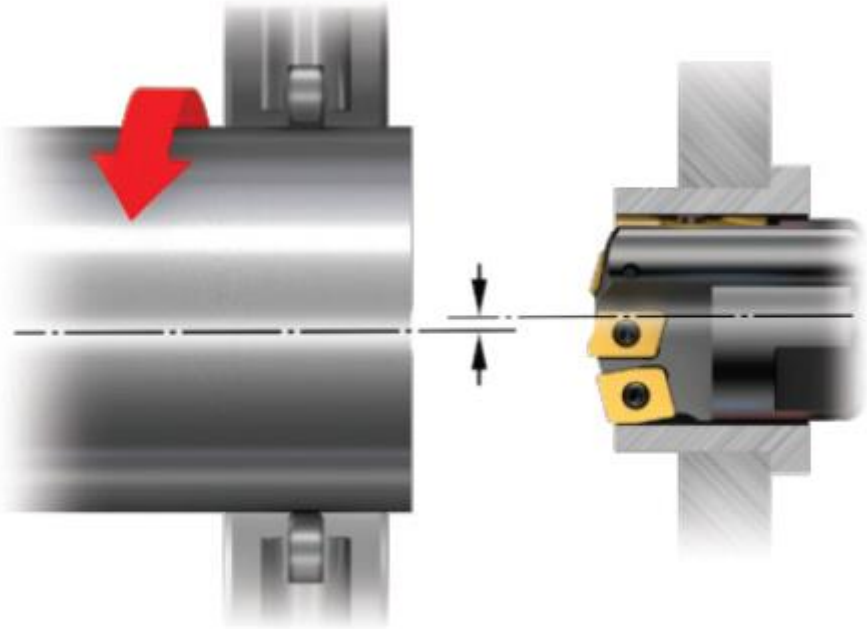
En la siguiente imagen puede observase la zona del patín mecanizada mediante rectificado, en la parte derecha.

Ilustración 39 Detalle zona patín en la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46 Distancia de equilibrado de alineación y estabilidad para el taladrado.



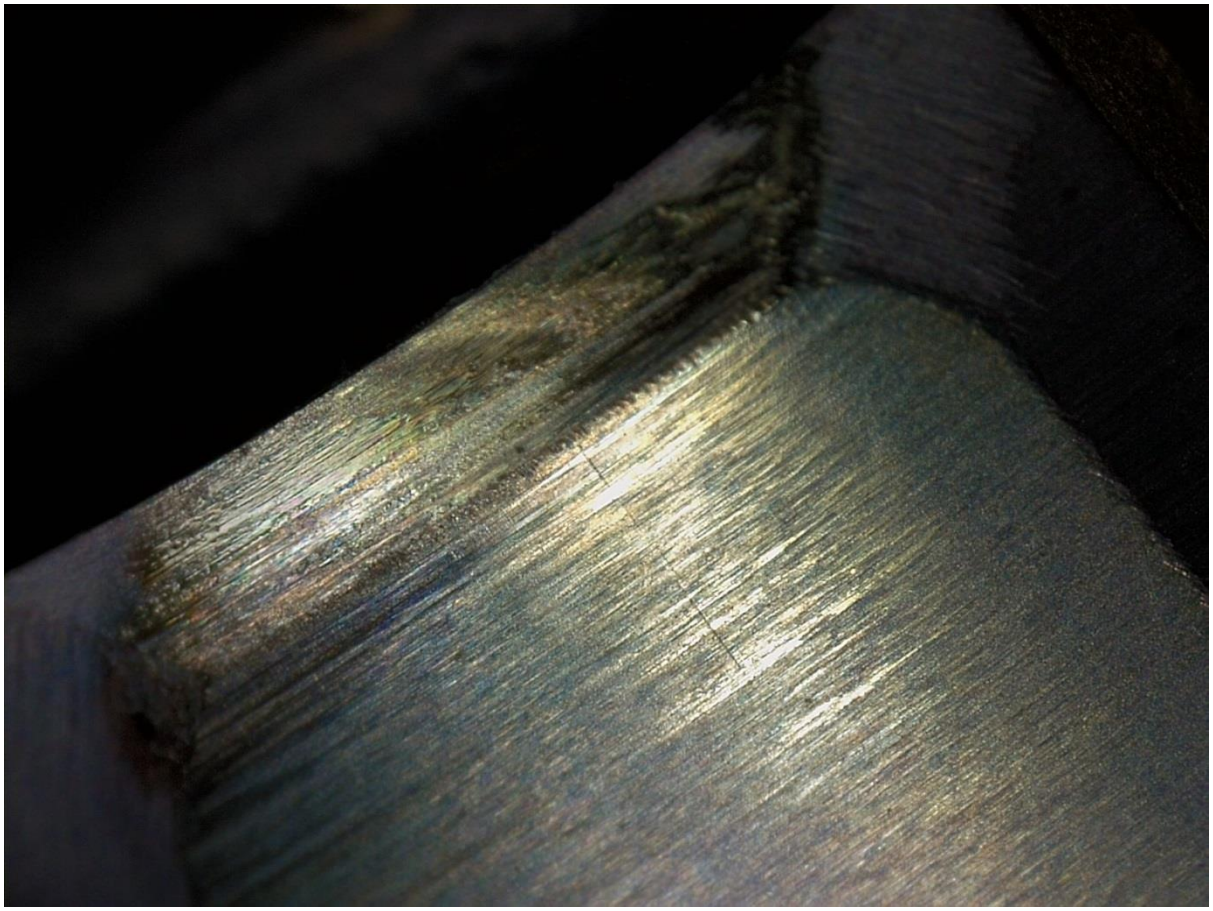
Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

Para garantizar una alineación correcta la distancia máxima de equilibrado se sitúa en torno a 0.02 milímetros.

Con esto también se consigue una minimización en las vibraciones, garantizado así estabilidad durante el proceso de mecanizado.

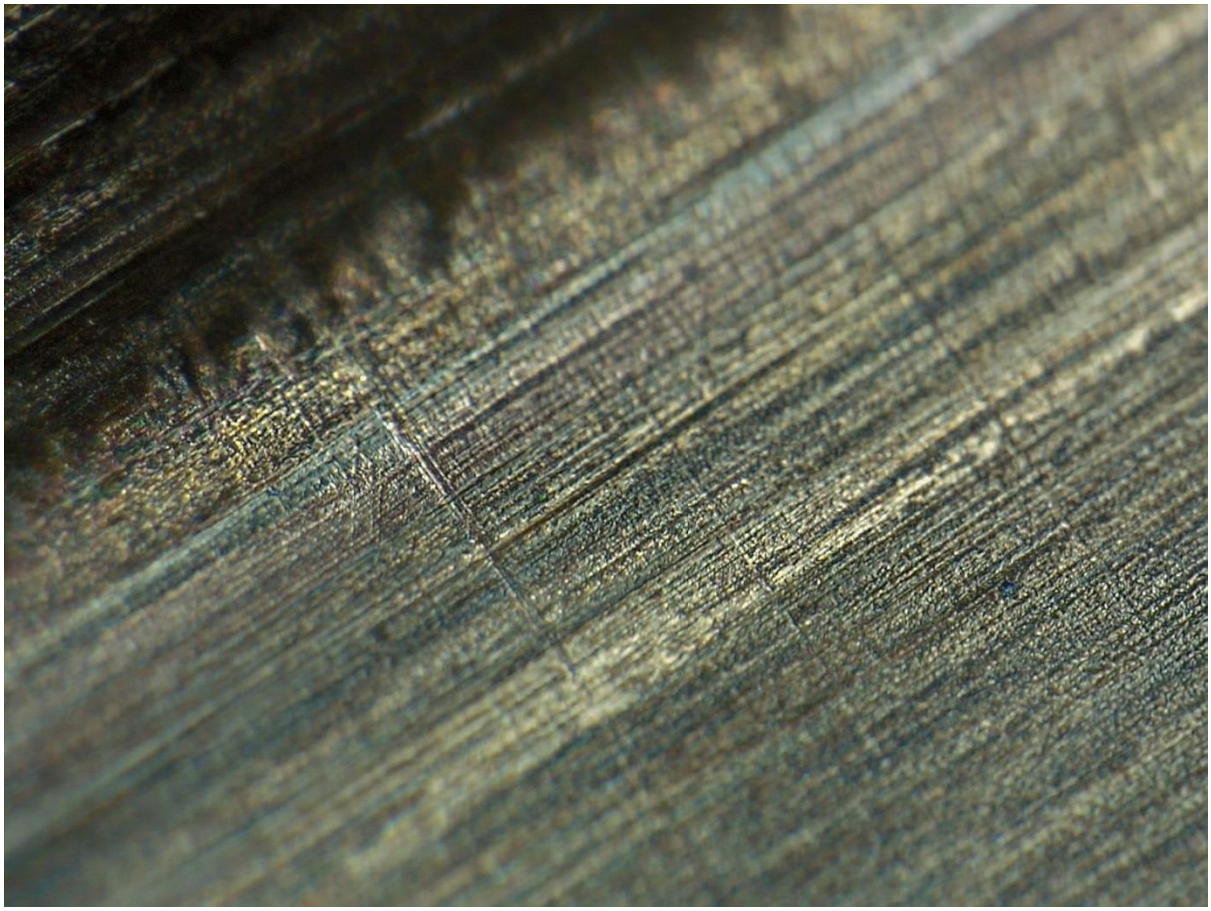
Estudio microscópico del patín

Ilustración 40 Detalle de la zona frontal del patín.



Fuente: Elaboración propia.

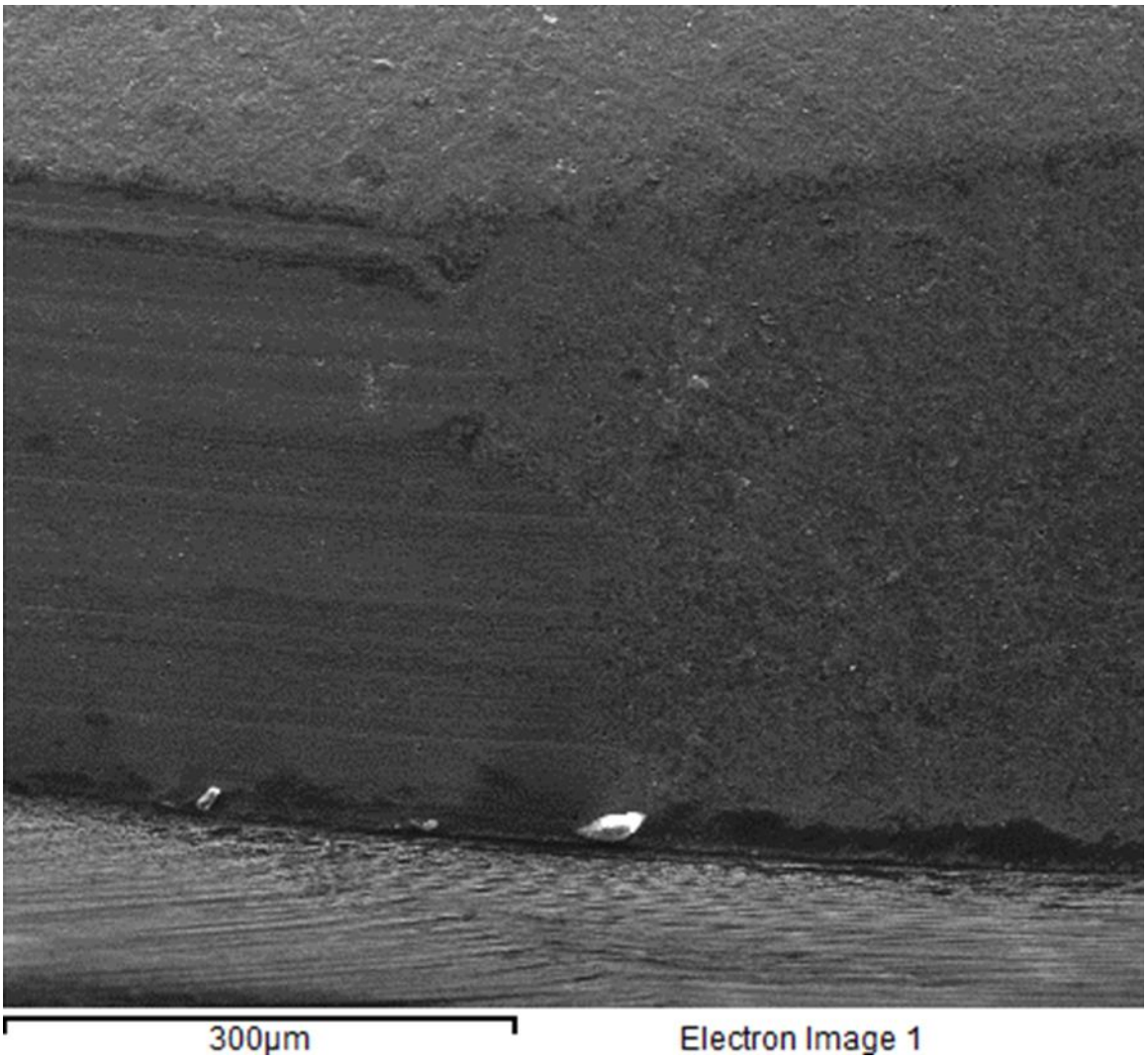
Ilustración 41 Detalle del borde superior del patín. No se observan grietas de fatiga térmica lo que indica que ha habido un buen caudal y presión del aceite de corte.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran unas imágenes captadas a través del microscopio electrónico de barrido, para realizar posteriormente un microanálisis de rayos X de los materiales presentes en el mismo.

Ilustración 42 Detalle al microscopio electrónico de barrido de la zona del patín de la herramienta mecanizado por rectificado.



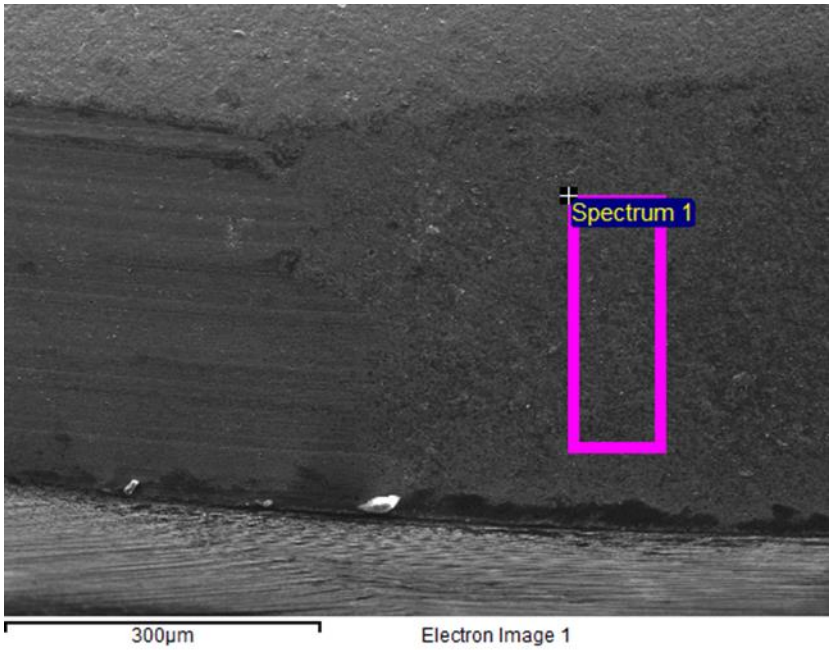
Fuente: Elaboración propia.

En la zona izquierda puede verse el mecanizado por rectificado que se ha llevado a cabo en esa zona.

La zona que hace de guía, la zona derecha, sufre por abrasión y altas temperaturas, por eso se mecaniza su geometría, para mantener centrada la herramienta y para que el radio de curvatura del agujero sea lo más preciso posible.

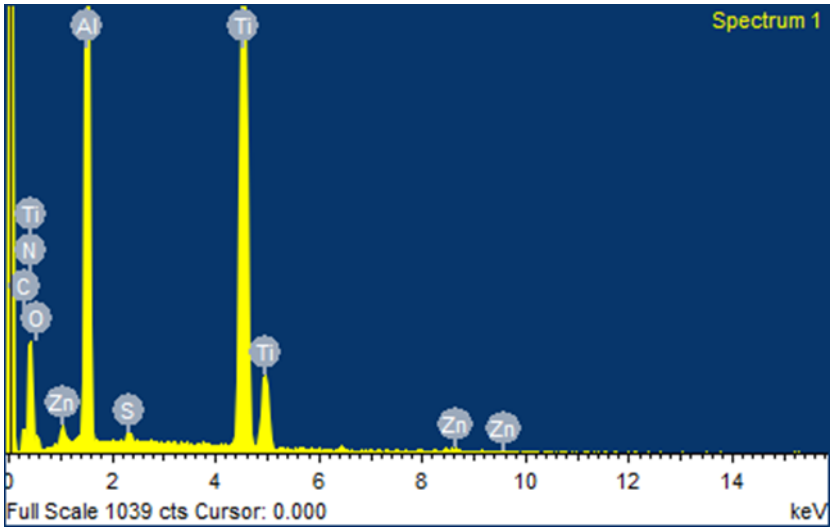
Estudiamos ahora la zona de la izquierda mediante microanálisis por rayos X, que determinará su composición.

Ilustración 43 Zona del patín analizada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47 Resultado microanálisis por rayos X (EDX o EDS) en la zona del patín de la herramienta.



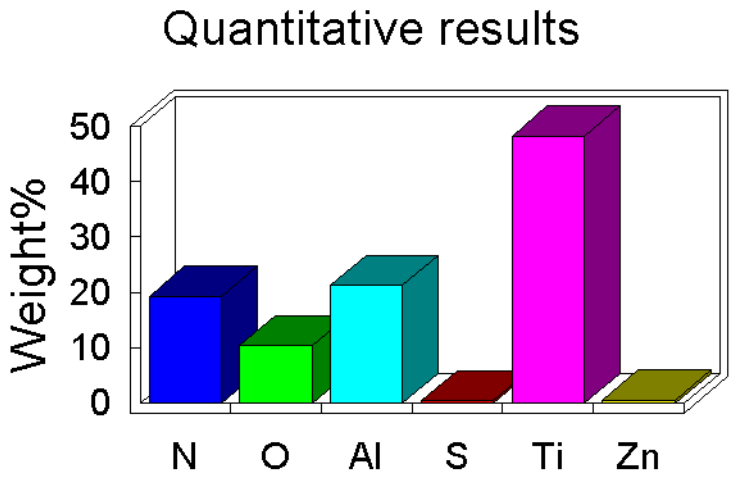
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15 Resultados obtenidos del microanálisis del patín de la herramienta.

Element	Weight%	Atomic%
N K	19.30	35.90
O K	10.38	16.90
Al K	21.20	20.48
S K	0.34	0.28
Ti K	48.16	26.20
Zn K	0.62	0.25

Fuente: Elaboración propia.

Figura 48 Gráfico de resultados de microanálisis por rayos X (EDX o EDS) en el patín de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

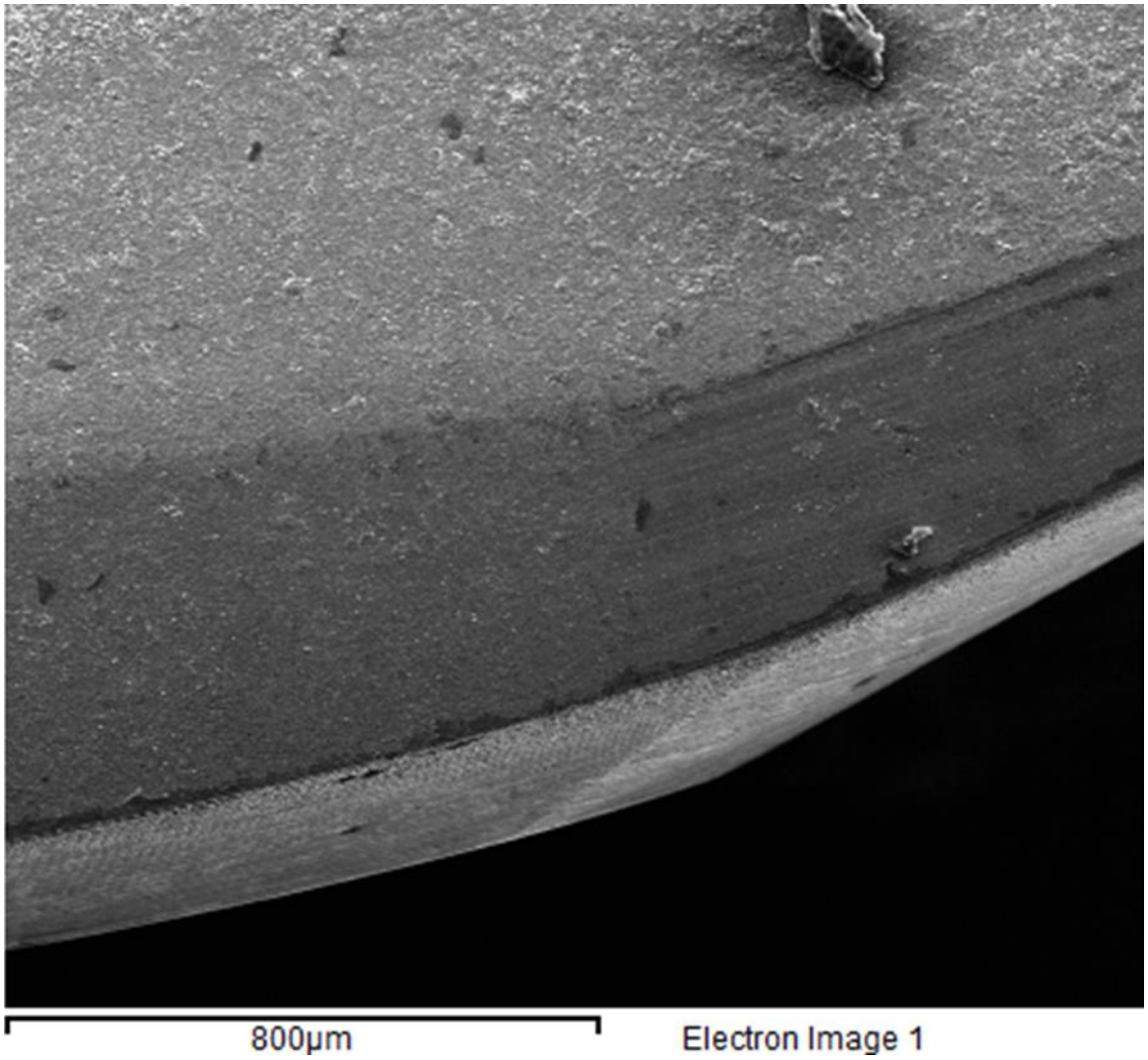
En el patín están presentes el Titanio (Ti) y el Nitrógeno (N), indica que sobre el patín existe un recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) junto a una capa más interna de alúmina (Al2O3), que ayudan a resistir la fricción y que ya se mencionó anteriormente.

La presencia de Oxigeno (O), indica la presencia de óxidos debido a las altas temperaturas durante el proceso de corte.

El Azufre (S) y el Zinc (Zn) proceden de los aditivos de extrema presión presentes en el aceite usado en el taladrado.

El análisis intrínseco del patín queda oculto por estas capas superficiales

Ilustración 44 Detalle zona del patín (derecha), mecanizada por rectificado.



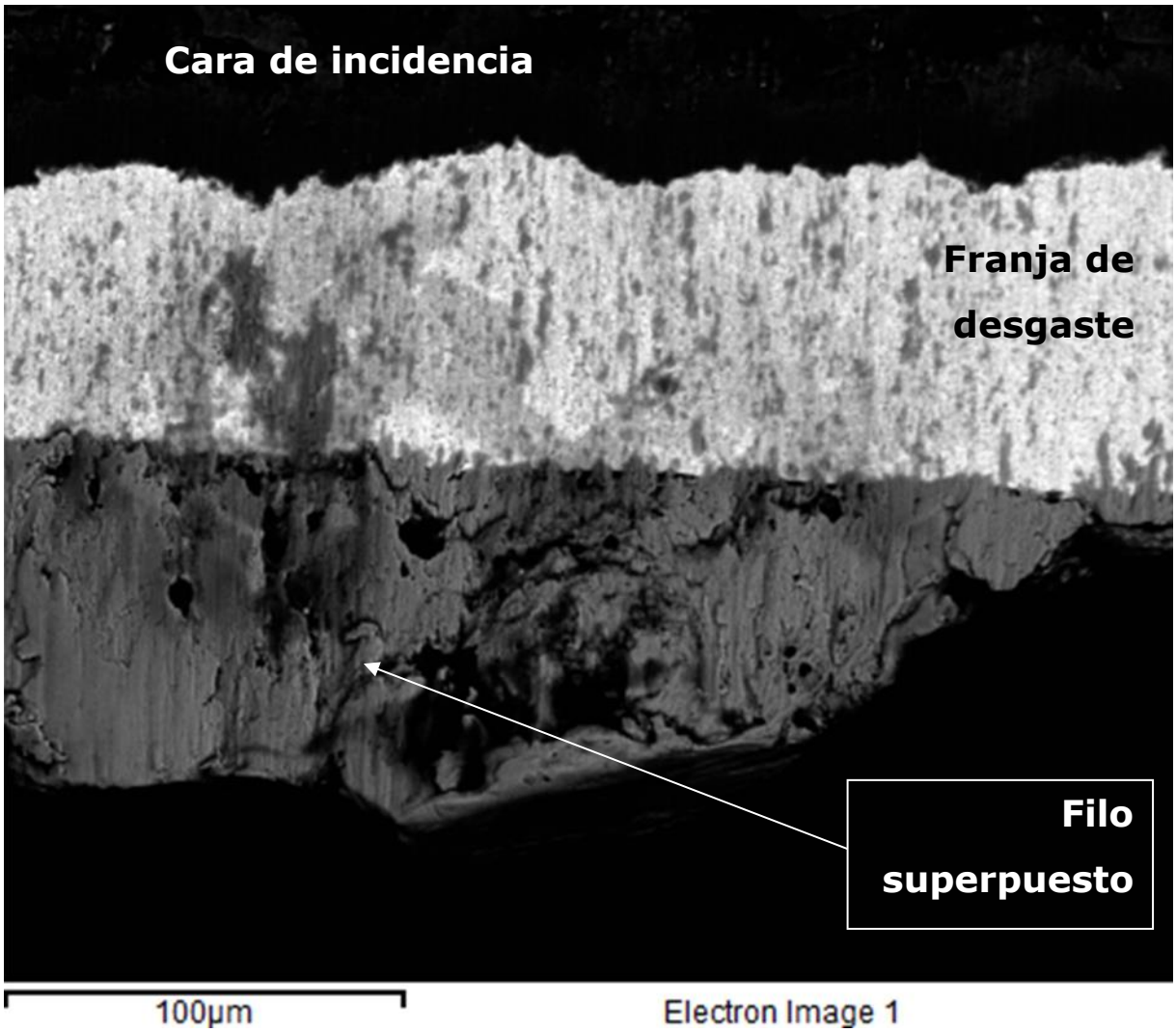
Fuente: Elaboración propia.

5.3.5 Relación del daño observado en nuestra herramienta (filo superpuesto, Abrasión)

Vamos a centrarnos ahora en el filo superpuesto cuya presencia, vista desde la cara de incidencia, ya mencionamos anteriormente. Así una zona del filo de la herramienta, en donde aparece filo superpuesto, realizaremos un microanálisis de rayos X a ambos lados del filo, para determinar los materiales presentes.

Este microanálisis determinará los materiales presentes en ambas lados y nos permitirá corroborar sin duda la existencia de filo superpuesto.

Ilustración 45 Detalle al microscopio electrónico de barrido del filo (cara de incidencia) donde aparece filo.



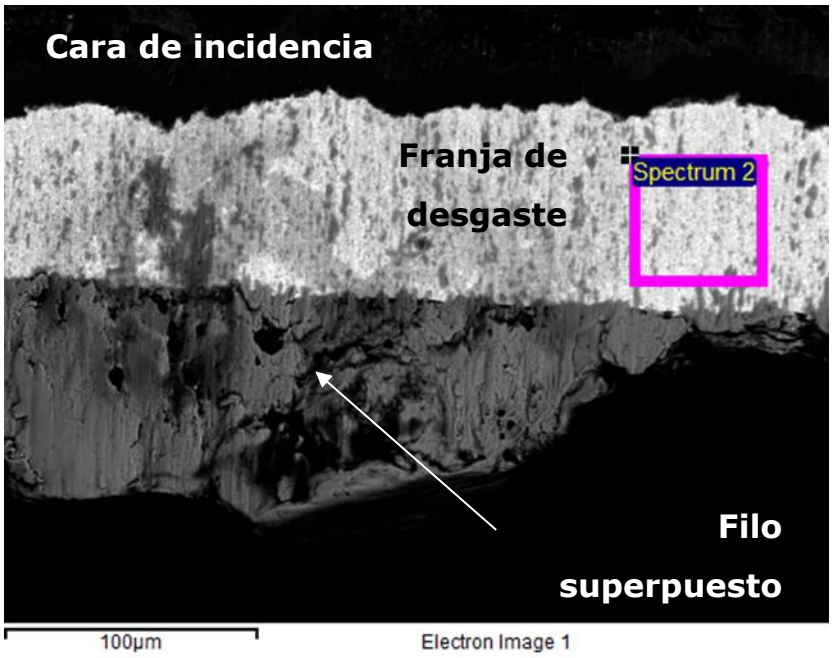
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la imagen pueden diferenciarse dos zonas en la figura anterior.

En las imágenes obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido en el modo de electrones retro-dispersados, las zonas donde hay mayor presencia de elementos con mayor peso atómico aparecen más claras, mientras que las zonas en las que están presentes elementos con menor peso atómico aparecen más oscuras.

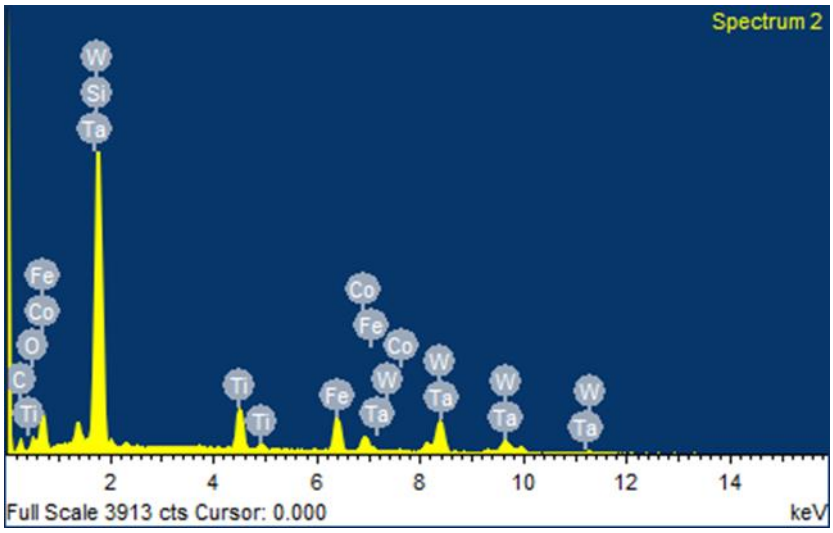
Analizamos primero la zona que aparece de color más claro en la imagen (con un superior contenido de elementos con mayor peso atómico). Posteriormente analizaremos la zona más oscura.

Ilustración 46 Zona del filo de la herramienta analizada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49 Resultado del microanálisis en la zona superior del filo.



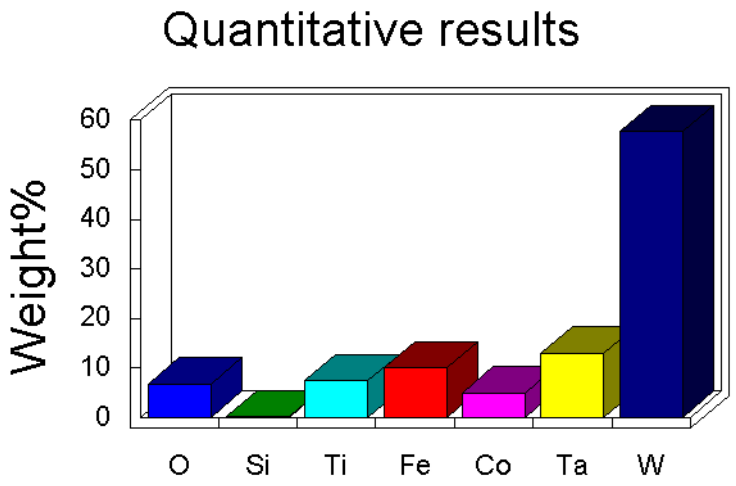
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16 Resultados obtenidos del microanálisis de la zona superior del filo.

Element	Weight%	Atomic%
O K	6.80	34.42
Si K	0.19	0.54
Ti K	7.55	12.76
Fe K	9.94	14.40
Co K	4.87	6.68
Ta M	13.04	5.83
W M	57.61	25.36

Fuente: Elaboración propia.

Figura 50 Gráfico de resultados en la zona superior del filo de la herramienta



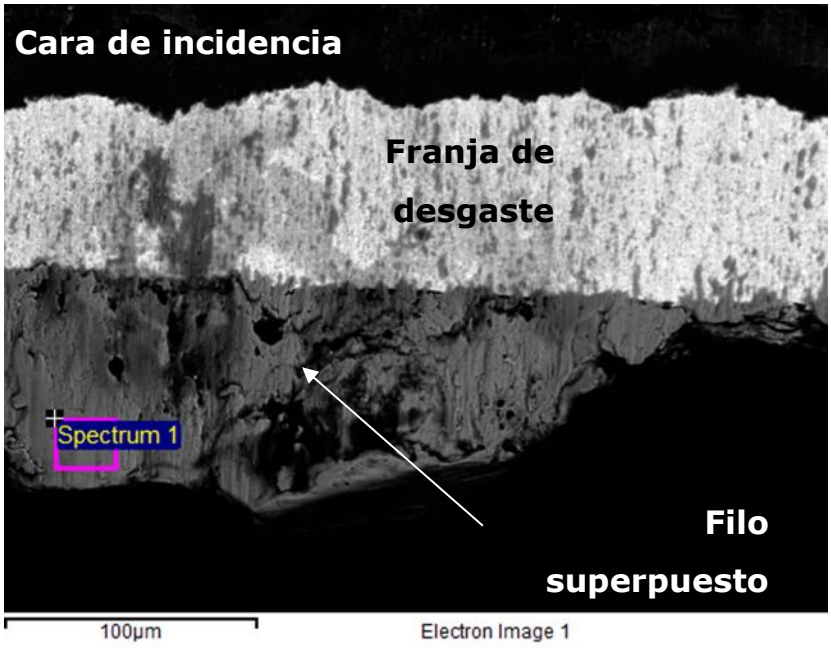
Fuente: Elaboración propia.

Como podemos ver en los resultados, los elementos mayoritarios en su conjunto (% en peso) corresponden al metal duro de la plaquita, a saber, Wolframio (W) Tántalo (Ta) y Cobalto (Co) y a su recubrimiento, Titanio (Ti).

Además se nota la omnipresencia del hierro (Fe) proveniente del acero de la placa tubular del generador, dada su gran ductilidad.

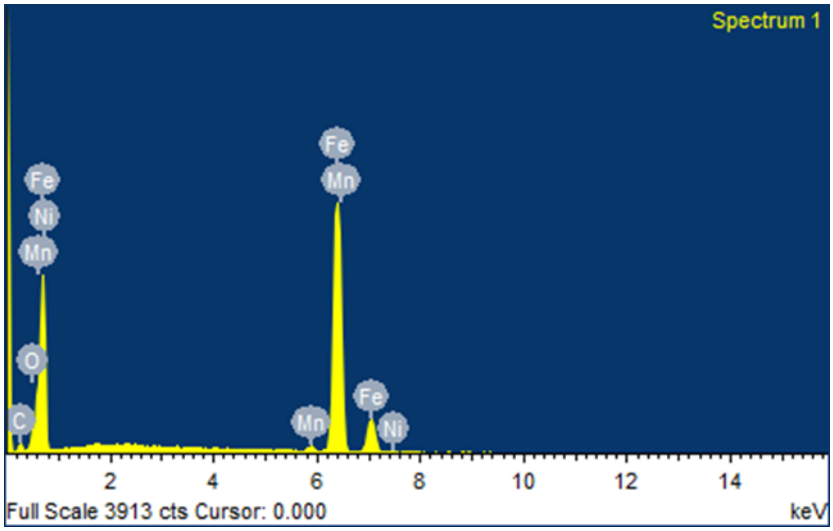
Ha continuación realizamos un microanálisis de la zona del filo de color más oscuro (presencia mayoritaria de metales con peso atómico menor).

Ilustración 47 Zona del filo analizada. Filo superpuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 51 Resultado del microanálisis por rayos X (EDX o EDS) en la zona de filo superpuesto.



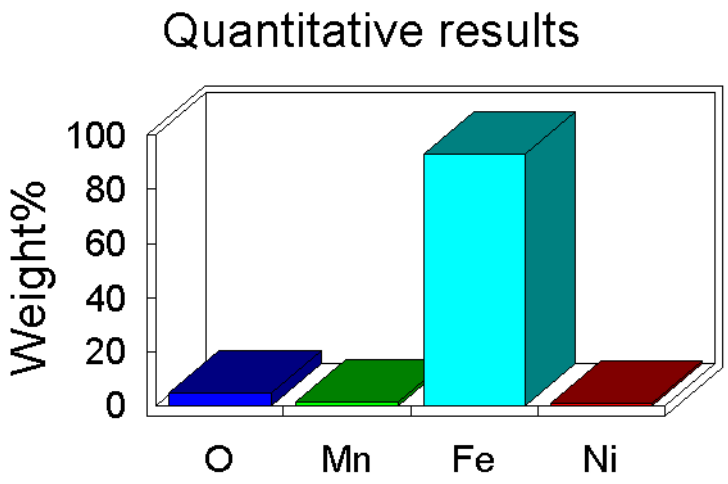
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17 Resultados obtenidos en el microanálisis de la zona de filo superpuesto.

Element	Weight%	Atomic%
O K	4.57	14.32
Mn K	1.54	1.41
Fe K	92.99	83.51
Ni K	0.90	0.77

Fuente: Elaboración propia.

Figura 52 Gráfico de resultados a partir del microanálisis de la zona de filo superpuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse en los resultados, el material predominante en ésta zona del filo es el Hierro (Fe).

Esto nos indica sin dudas que esta zona no pertenece al filo propiamente, sino que se trata de material mecanizado de la placa tubular (acero aleado con manganeso Mn y níquel Ni, elementos también observados aquí) que se ha adherido al filo, es decir, que es filo superpuesto.

5.4 Control de la viruta. Su observación y análisis

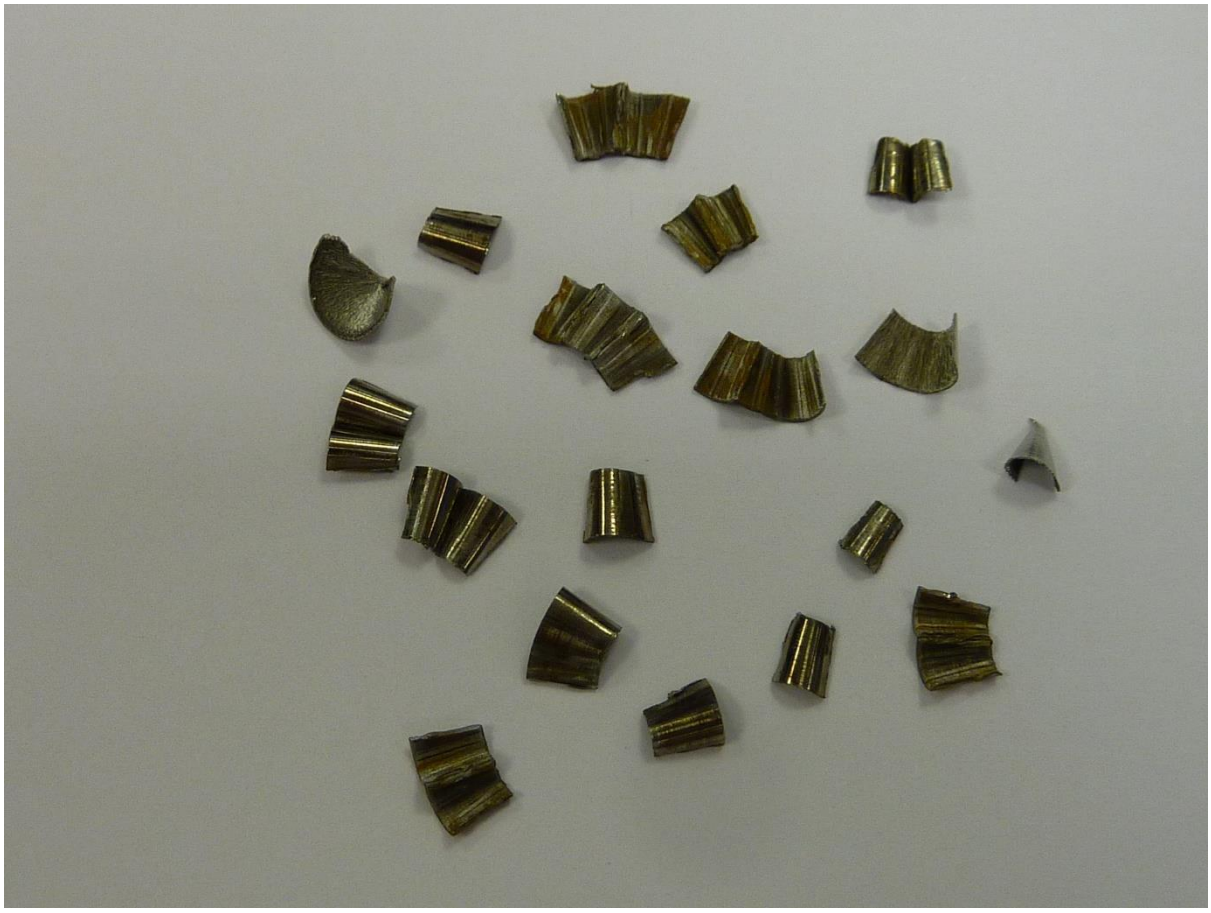
Uno de los factores que garantiza el funcionamiento de las herramientas BTA es el movimiento fluido de las virutas a través de la cabeza de la herramienta y el tubo interior.

Este es el motivo por el que la formación de la viruta ocupe la primera posición en la lista de prioridades.

La segunda posición la ocupa la potencia de máquina disponible. La vida útil de la herramienta, es un factor menos importante.

5.4.1 Formación de la viruta

Ilustración 48 Viruta de la operación de taladrado BTA.



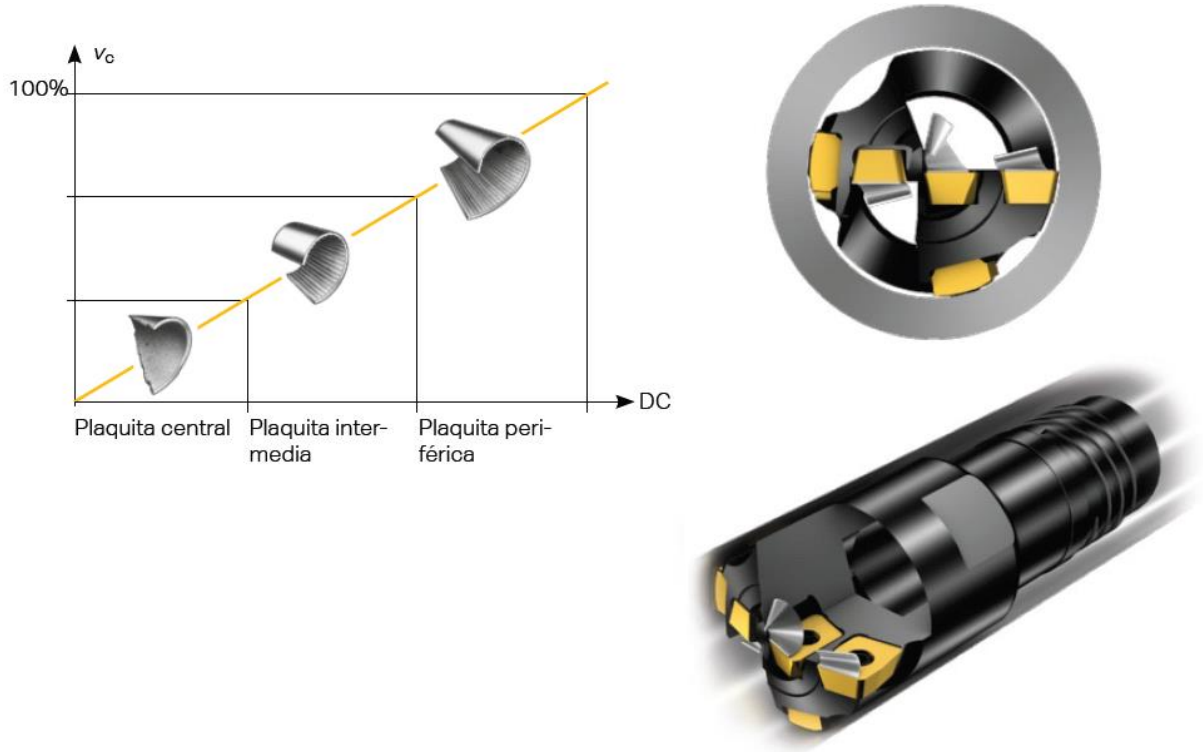
Fuente: Elaboración propia.

En el taladrado de acero de baja aleación, una buena formación de la viruta depende de la combinación de la geometría rompevirutas, la velocidad, el avance y, en determinados materiales, la elección del aceite de corte.

El factor principal es que las virutas se formen y rompan de tal modo que su forma y tamaño permitan un caudal fluido y constante a través de los conductos para las virutas.

La siguiente imagen se muestran tres formas de viruta generadas por las plaquitas central, intermedia y periférica.

Figura 53 Formación de las virutas.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

5.4.2 Rompevirutas

De importancia primordial en las operaciones de perforación es transportar las virutas lejos de los bordes de corte de la broca.

Las virutas excesivamente largas y grandes pueden quedar atascadas en los conductos de expulsión. Una viruta adecuada ha de tener un largo y un ancho determinado, sin embargo, las virutas no se deben romper más difícilmente de lo necesario, puesto que romper virutas es sinónimo de consumo de energía además, el calor que se genera aumenta el desgaste en los bordes de corte.

La formación de virutas se ve afectada por el material de trabajo, la geometría del rompevirutas, la velocidad de corte, la alimentación y la elección del fluido de corte.

5.4.3 Influencia de la velocidad de corte y el avance

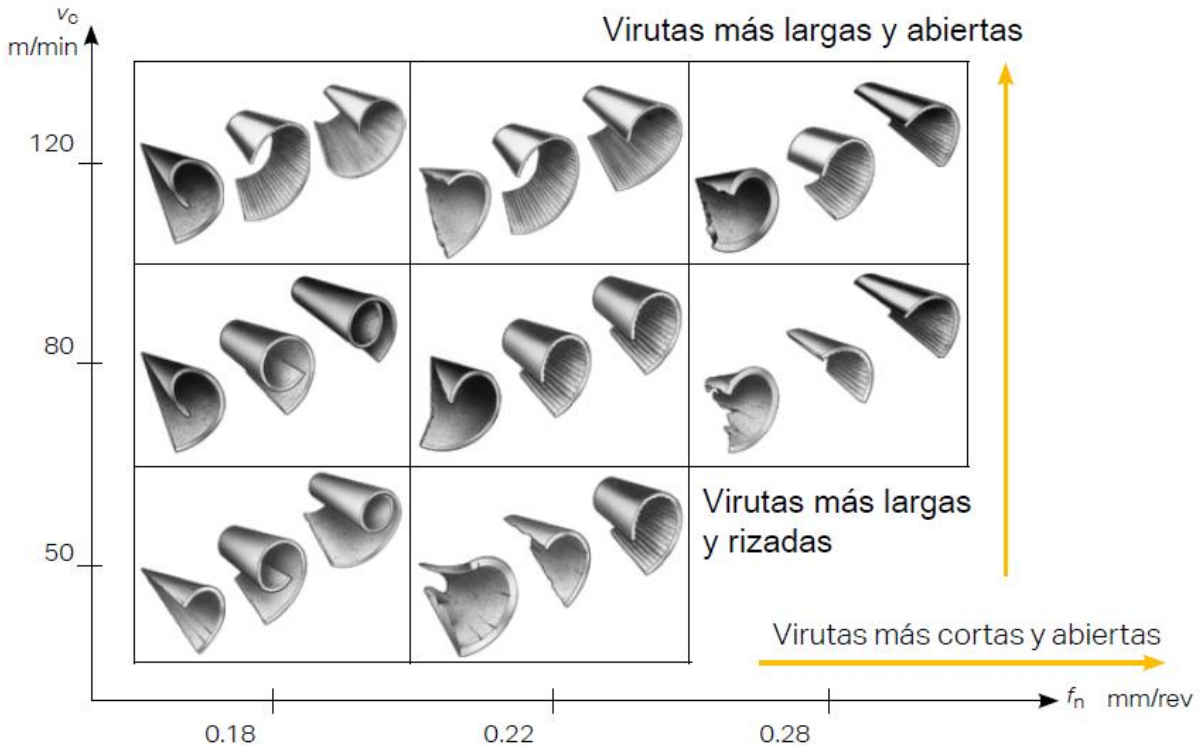
Es posible que, en las pruebas realizadas, se consiga una buena formación de la viruta de las plaquitas central e intermedia, pero que la plaquita periférica genere una viruta excesivamente larga.

Para conseguir virutas más cortas, el avance suele incrementarse, lo cual puede resultar en unas virutas demasiado densas en las plaquitas central e intermedia.

Cuando de las plaquitas centrales se obtiene una viruta gruesa y compacta con forma de cinta larga, reducir el avance puede resolver el problema y corregir la forma de la viruta.

Entonces, puede reducirse la velocidad (esto tiene el efecto de acortar la viruta) para conseguir una viruta aceptable de la plaquita periférica.

Figura 54 Esquema del tipo de viruta obtenida dependiendo de la velocidad de corte y el avance.



Fuente: Sandvik "Product catalog and application guide".

La rotura de la viruta depende de la velocidad y el avance. La gama de rotura de la viruta de una herramienta de taladrado aparece ilustrada en la imagen superior. La herramienta mecaniza en el mismo material de trabajo pero con combinaciones de velocidad de corte y avance diferentes.

Las virutas más cortas se obtienen al incrementar el avance y/o reducir la velocidad de corte.

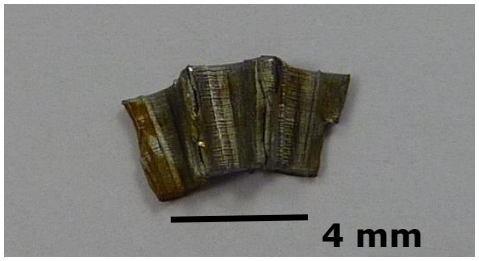
5.4.4 Estudio de nuestra viruta

A continuación realizaremos un análisis de las virutas producidas durante el taladrado de la placa tubo.

Estudiaremos por separado las dos caras de las virutas, por la que pasa el filo de la herramienta y la cara opuesta.

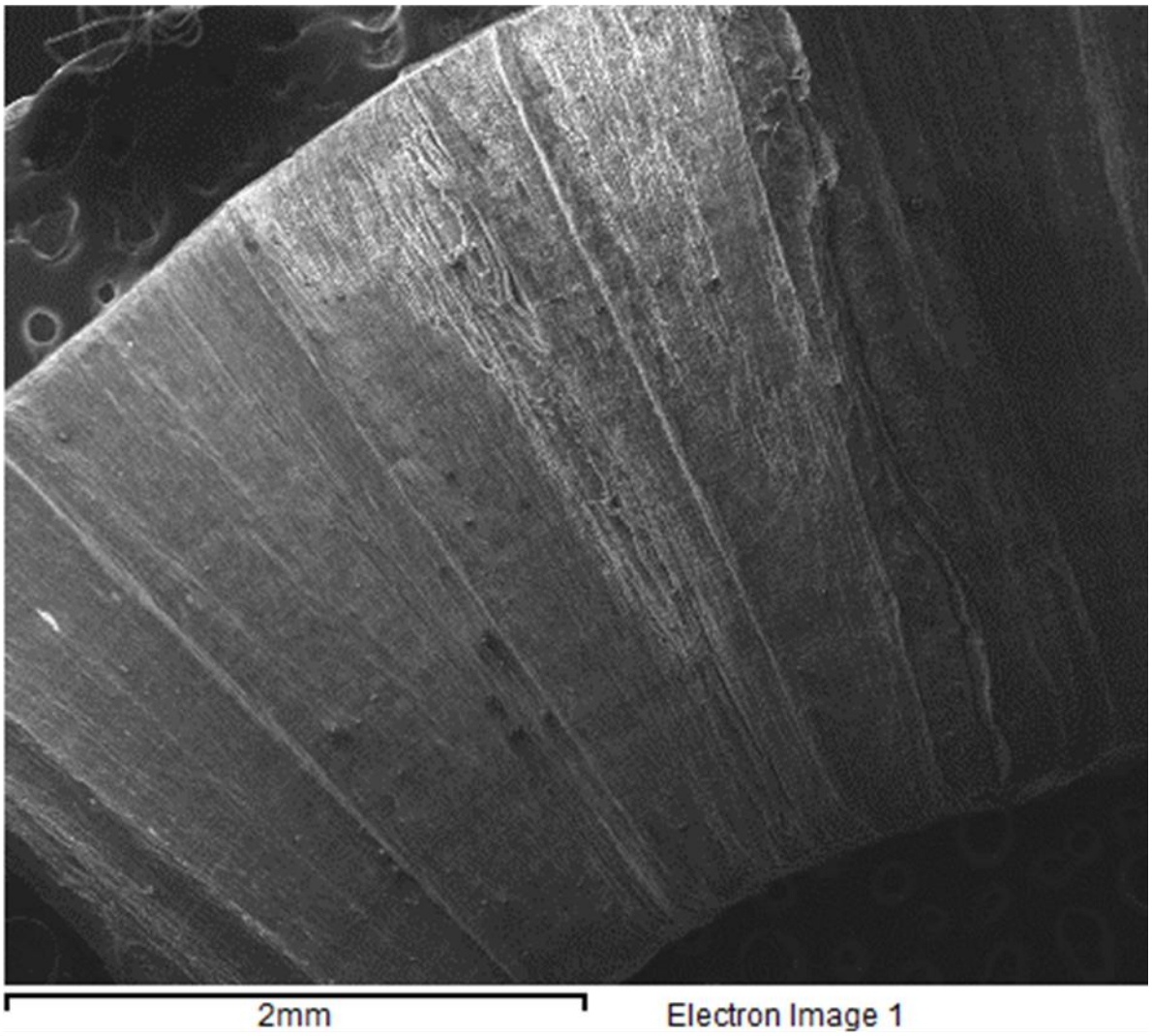
Cara de la viruta por la que no pasa el filo de la herramienta

Ilustración 49 Cara de la viruta por la que no pasa el filo de la herramienta.



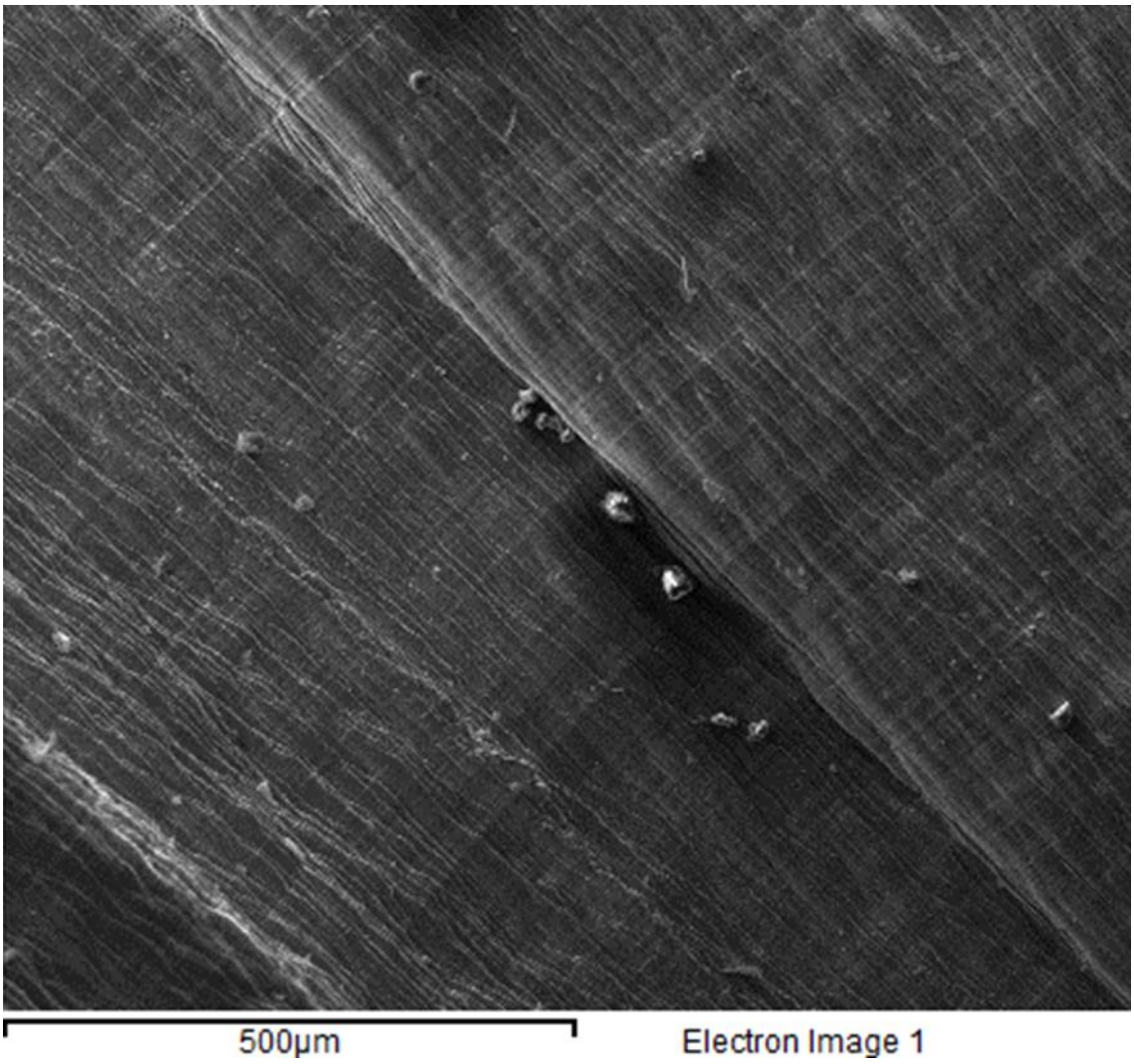
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 50 Sección de viruta. Zona por donde no ha pasado del filo de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 51 Viruta por la cara por la que no ha pasado el filo de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

En las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido de la viruta por donde no ha pasado el filo de la herramienta, podemos ver como en el material aparecen "arrugas", que son debidas al radio de curvatura de la viruta el cual produce una deformación en su superficie durante el proceso de corte.

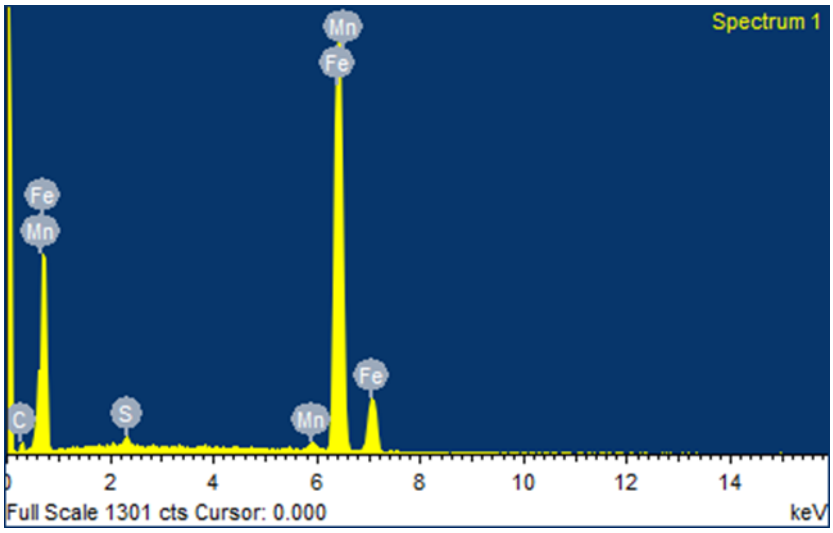
Vamos a realizar a continuación un microanálisis de la composición de materiales de la viruta.

Ilustración 52 Zona de la viruta (por donde no ha pasado el filo) analizada.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Figura 55 Microanálisis por rayos X (EDX o EDS), cara de la viruta por donde no ha pasado el filo de la herramienta.



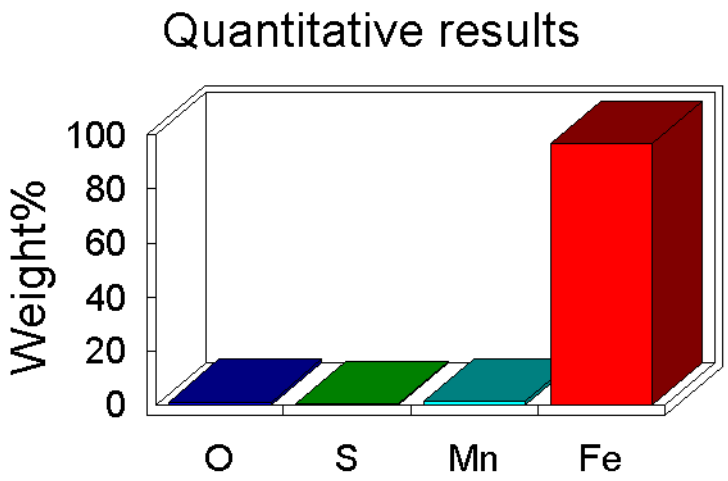
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18 Resultados del microanálisis de la zona por donde no ha pasado el filo de la herramienta.

Element	Weight%	Atomic%
O K	1.24	4.17
S K	0.61	1.02
Mn K	1.54	1.51
Fe K	96.61	93.29

Fuente: Elaboración propia.

Figura 56 Gráfico de resultados de Microanálisis por rayos X (EDX o EDS) de la cara de la viruta por donde no ha pasado el filo de la herramienta.

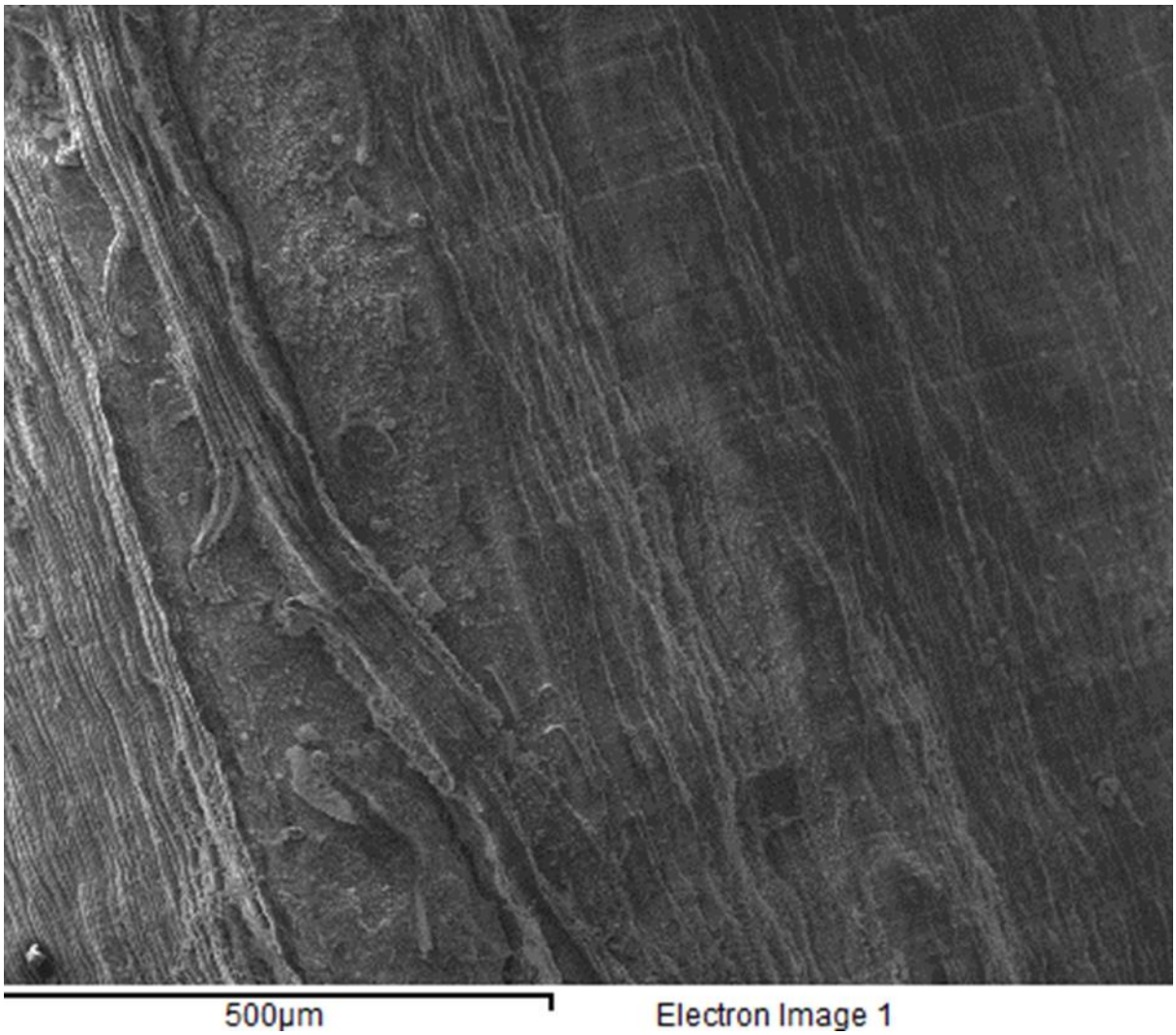


Fuente: Elaboración propia.

Como podemos ver en los resultados obtenidos en el microanálisis de rayos X, el material que predomina en la viruta es el hierro (Fe), también se observa algo de manganeso (Mn), lo que es lógico en el acero de baja aleación de nuestra placa tubular. El azufre (S) lo atribuimos al aditivo de extrema presión del aceite de corte. El oxígeno (O) se debería a oxidación producida por las altas temperaturas generadas en el corte.

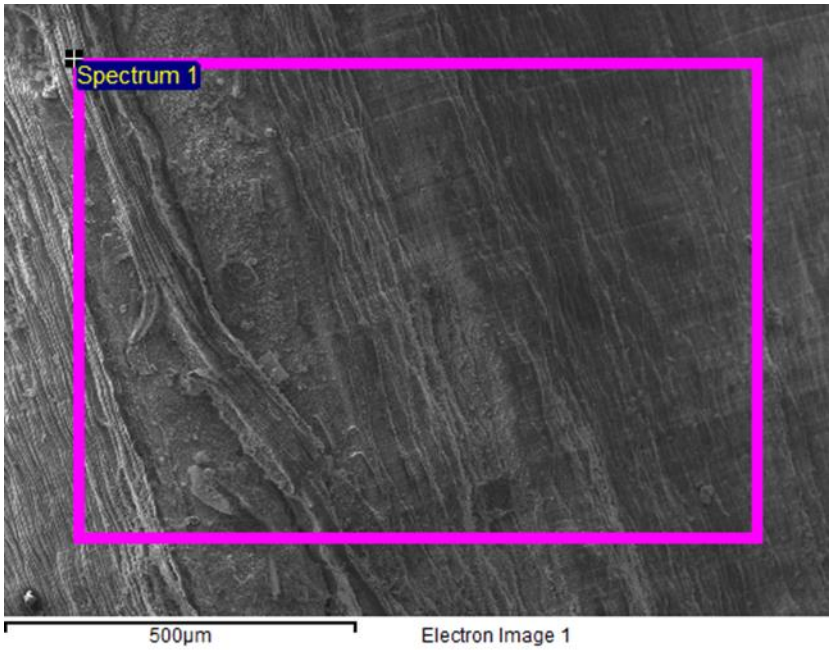
Como era de esperar, el mismo resultado se viene a obtener al observar un detalle de esta zona a mayores aumentos:

Ilustración 53 Detalle de la zona de la viruta por donde no ha pasado el filo de la herramienta



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 54 Detalle analizado en la cara de la viruta por donde no ha pasado el filo de la herramienta observada a mayor aumento.



Fuente: Elaboración propia.

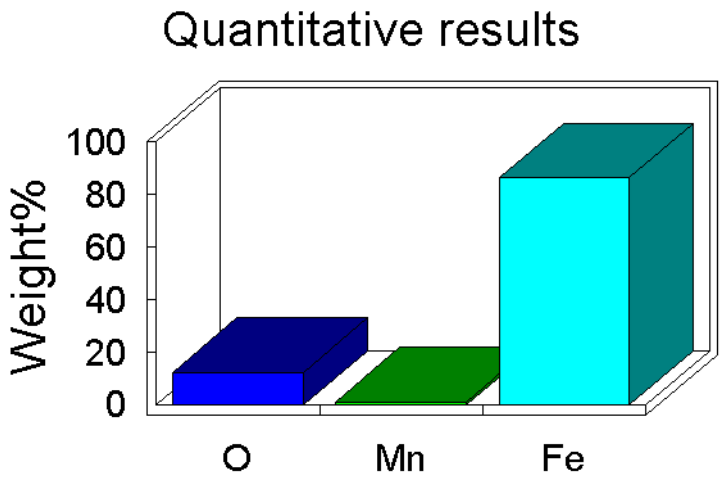
Se obtienen entonces los siguientes resultados:

Tabla 19 Resultados del microanálisis a un mayor número de aumentos en la cara de la viruta por donde no ha pasado el filo de la herramienta.

Element	Weight%	Atomic%
O K	12.46	33.18
Mn K	1.29	1.00
Fe K	86.25	65.81

Fuente: Elaboración propia.

Figura 57 Gráfico del microanálisis por RX análisis del detalle de la cara de la viruta por donde no ha pasado el filo.

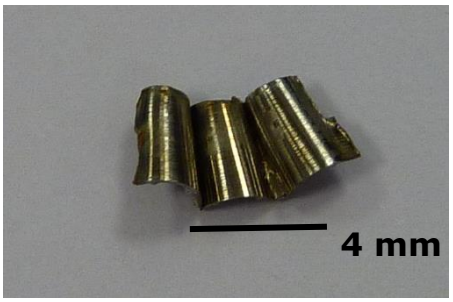


Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, el material presente en mayor medida vuelve a ser el hierro (Fe).

<u>Cara de la viruta por la que pasa el filo de la herramienta</u>

Ilustración 55 Cara de la viruta por la que pasa el filo de la herramienta.

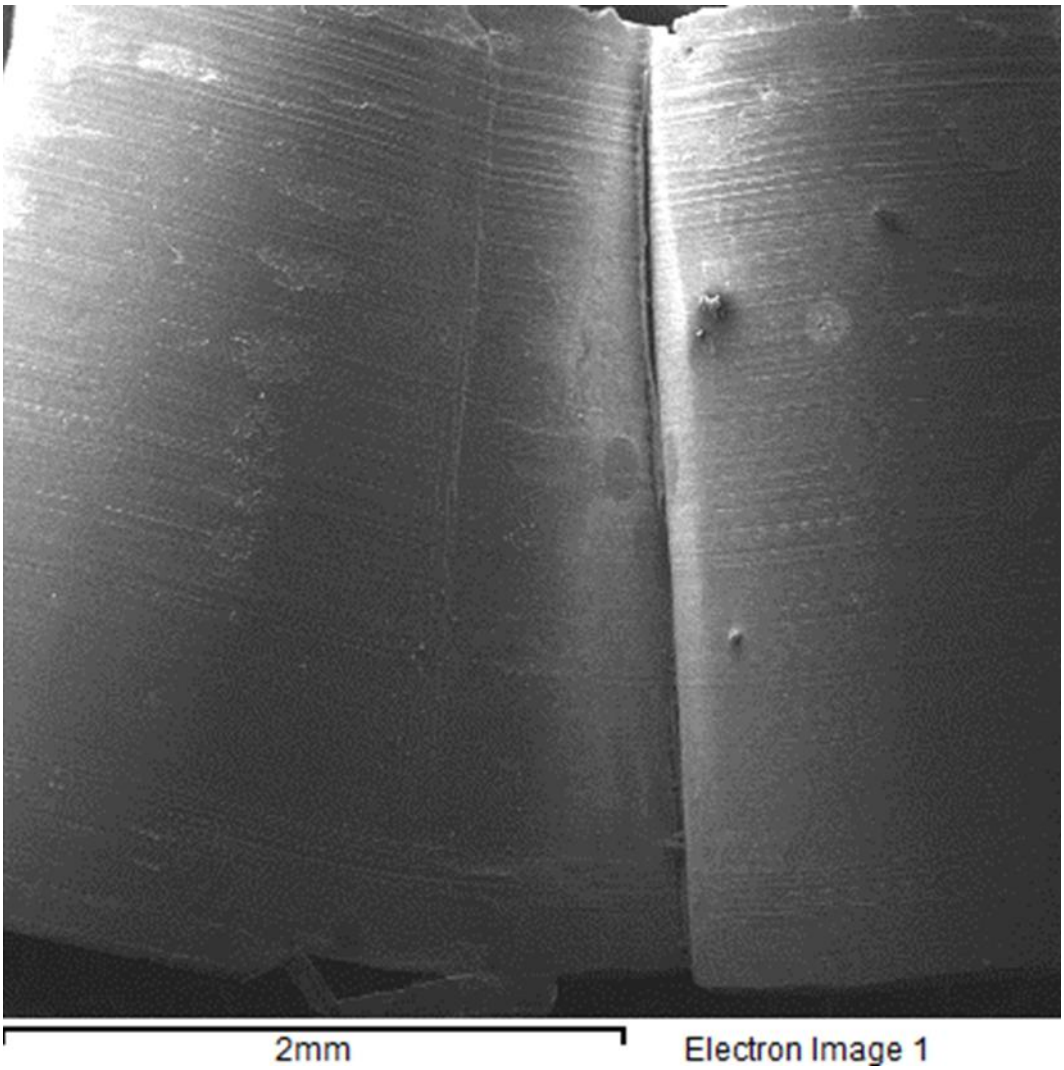


Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en esta ocasión, la superficie de la viruta es lisa y aparecen en la misma unas líneas muy tenues uniformes que siguen la dirección longitudinal de la viruta.

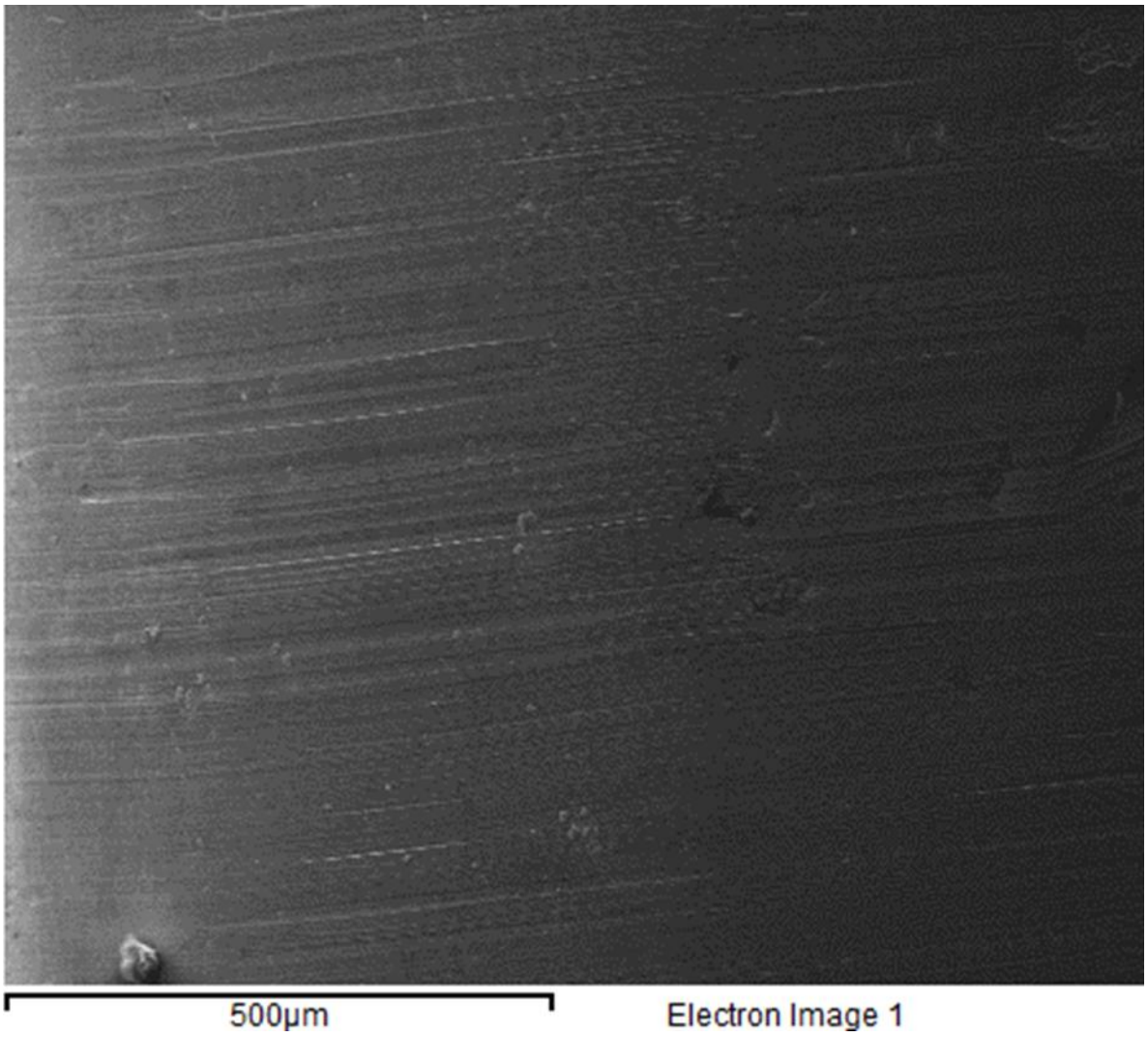
Estas líneas son producidas por la geometría del filo que pese a estar bien afilado, no es una línea perfecta.

Ilustración 56 Zona de la viruta por donde ha pasado el filo de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

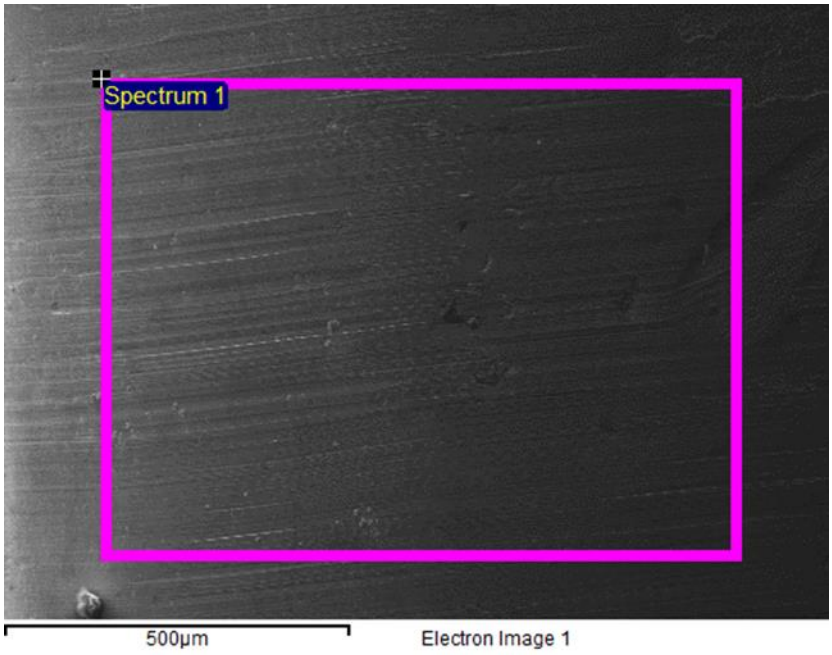
Ilustración 57 Zona de la viruta por donde pasa el filo de la herramienta a mayores aumentos.



Fuente: Elaboración propia.

Realizamos a continuación la zona detallada en la siguiente figura:

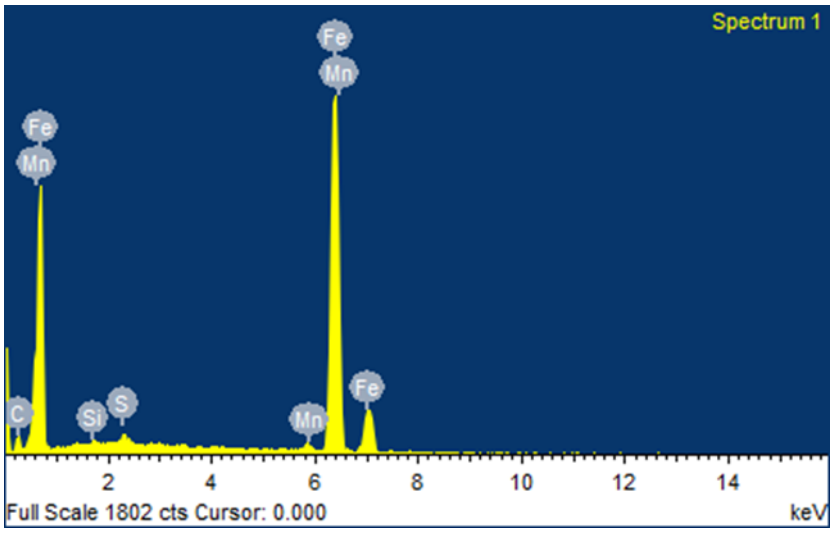
Ilustración 58 Zona de la viruta por donde pasa el filo.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

Figura 58 Espectro de la zona analizada por donde ha pasado el filo de la herramienta en la viruta.



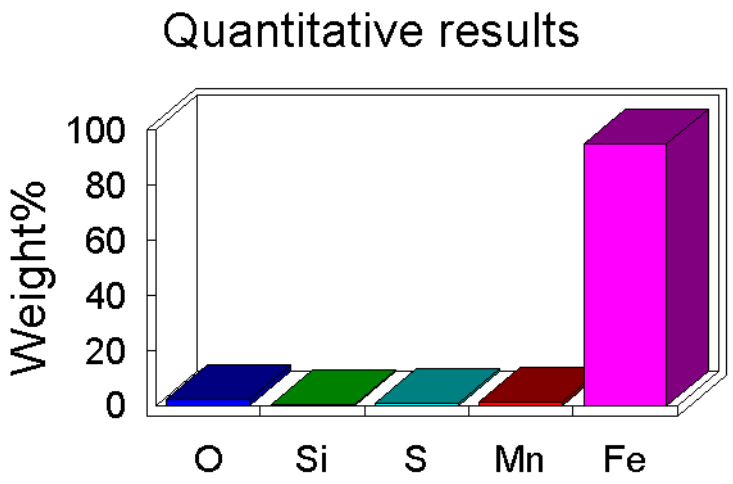
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20 Resultados del microanálisis en zona de la viruta por donde ha pasado el filo de la herramienta.

Element	Weight%	Atomic%
Si K	0.52	1.03
S K	0.78	1.34
Mn K	1.41	1.41
Fe K	97.29	96.22

Fuente: Elaboración propia.

Figura 59 Gráfico de resultados del microanálisis en la cara de la viruta que ha sido mecanizada por la herramienta.

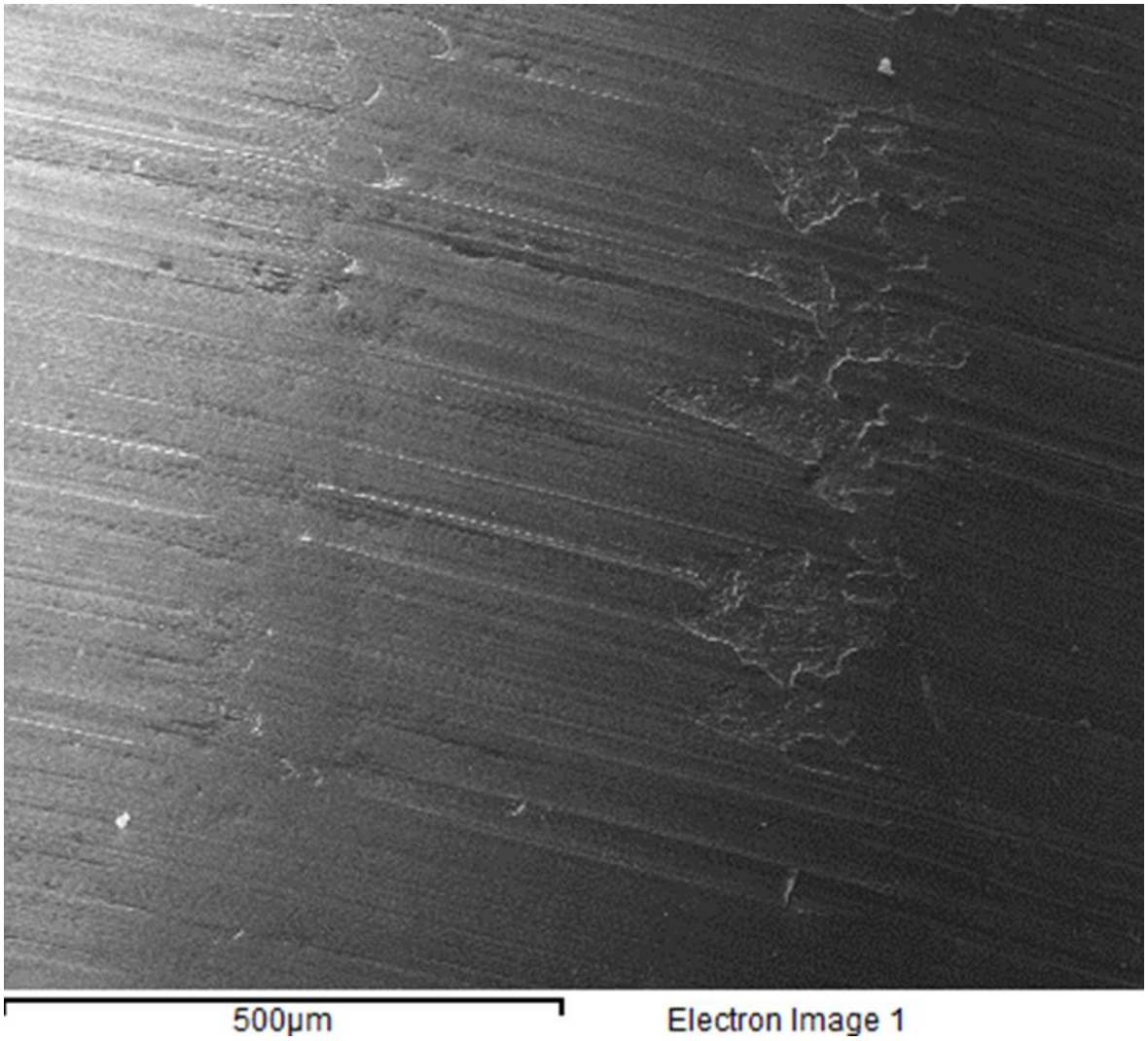


Fuente: Elaboración propia.

En los resultados obtenidos, vemos que vuelve ha aparecer el hierro (Fe), material predominante en la placa tubular, ya que como ya hemos indicado está fabricada en acero de baja aleación.

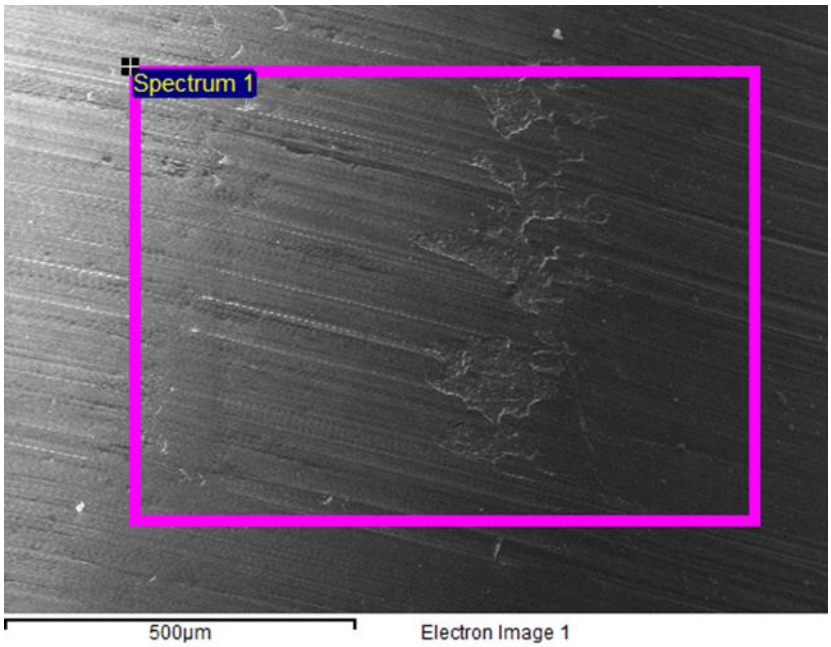
Estudiamos ahora otra zona de interés de la viruta:

Ilustración 59 Zona de la viruta por donde ha pasado el filo.



Fuente: Elaboración propia.

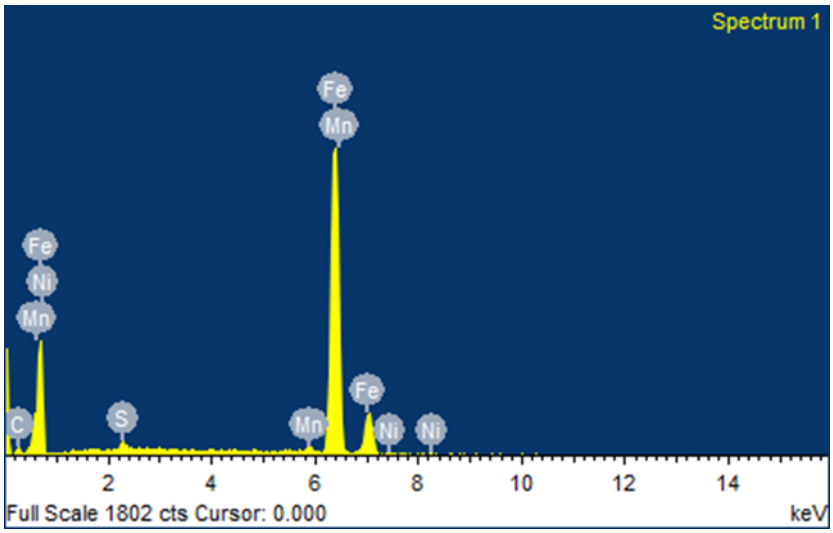
Ilustración 60 Zona estudiada de la viruta, por la cara por donde ha pasado el filo.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados obtenidos durante el ensayo:

Figura 60 Espectro obtenido para la zona estudiada de la viruta (por donde ha pasado el filo).



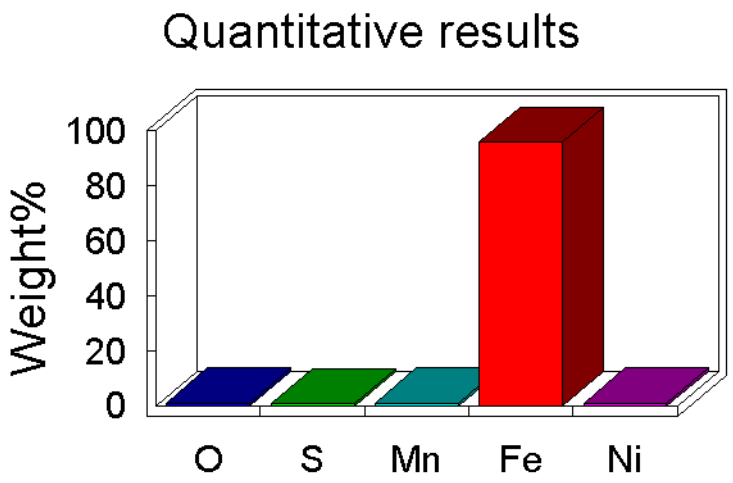
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21 Resultados del microanálisis en la cara de la viruta que ha sido mecanizada por la herramienta.

Element	Weight%	Atomic%
O K	1.03	3.48
S K	0.79	1.34
Mn K	1.17	1.16
Fe K	95.98	93.08
Ni K	1.02	0.94

Fuente: Elaboración propia.

Figura 61 Gráfico de resultados del espectro en la cara de la viruta que ha sido mecanizada por la herramienta.



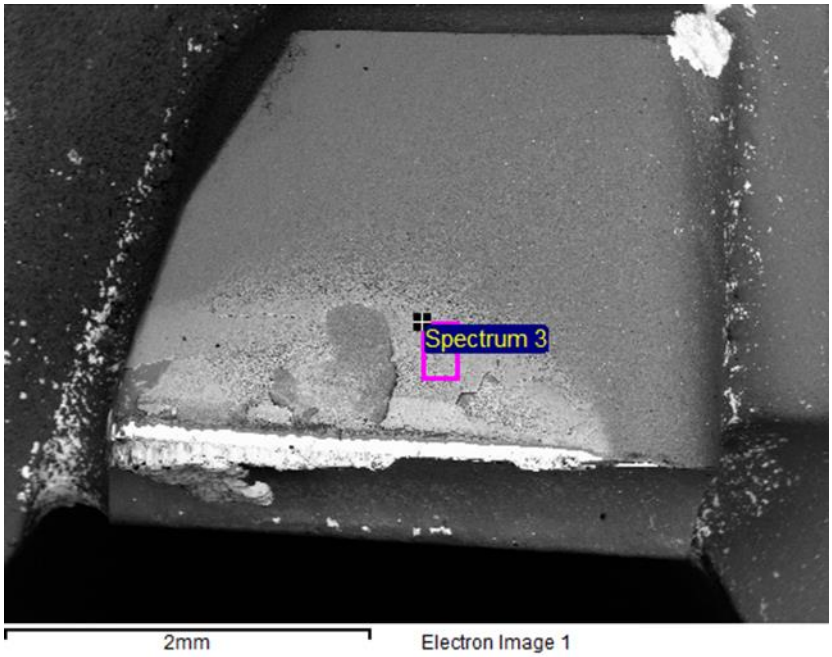
Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene nuevamente como material predominante el hierro (Fe). No se ha observado la presencia de algún resto desprendido del filo.

5.5 Análisis de los restos de fluido de corte en la herramienta

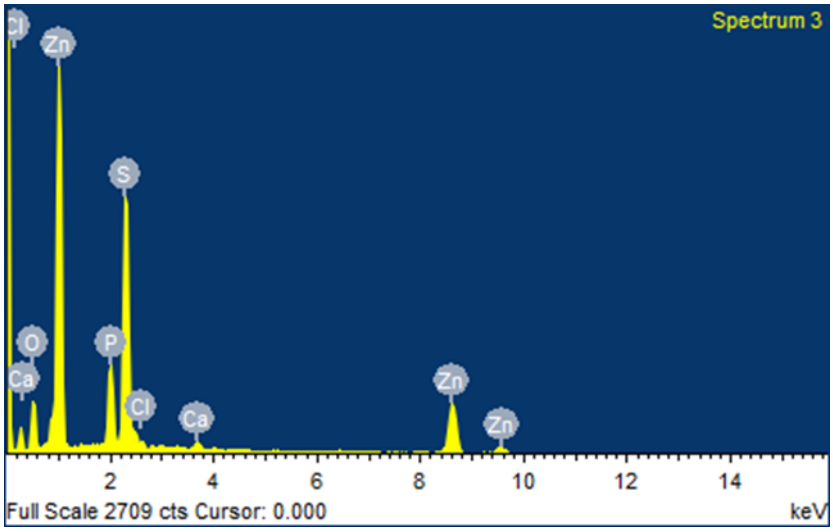
Vamos a realizar a continuación un microanálisis de rayos X en las zonas donde se ha adherido fluido de corte en la herramienta:

Figura 62 Zona de la plaquita central con resto de fluido de corte.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 63 Resultados obtenidos del microanálisis.



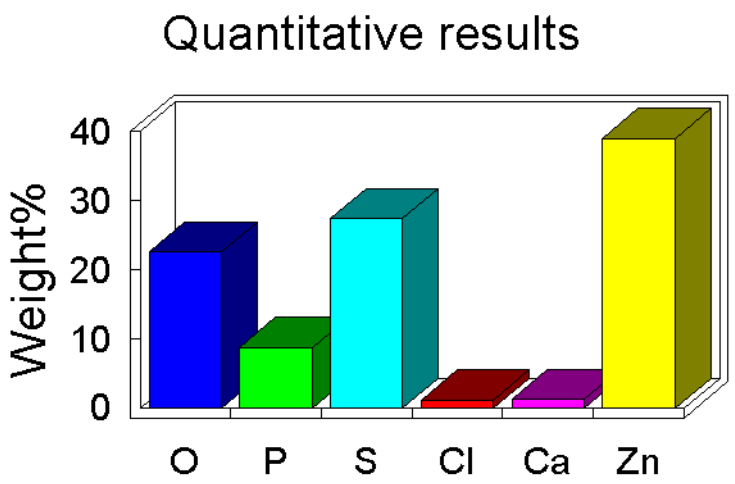
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22 Resultados del microanálisis.

Element	Weight%	Atomic%
O K	22.52	43.94
P K	8.76	8.83
S K	27.40	26.66
Cl K	1.15	1.01
Ca K	1.27	0.99
Zn K	38.90	18.57

Fuente: Elaboración propia.

Figura 64 Grafico de resultados del microanálisis.

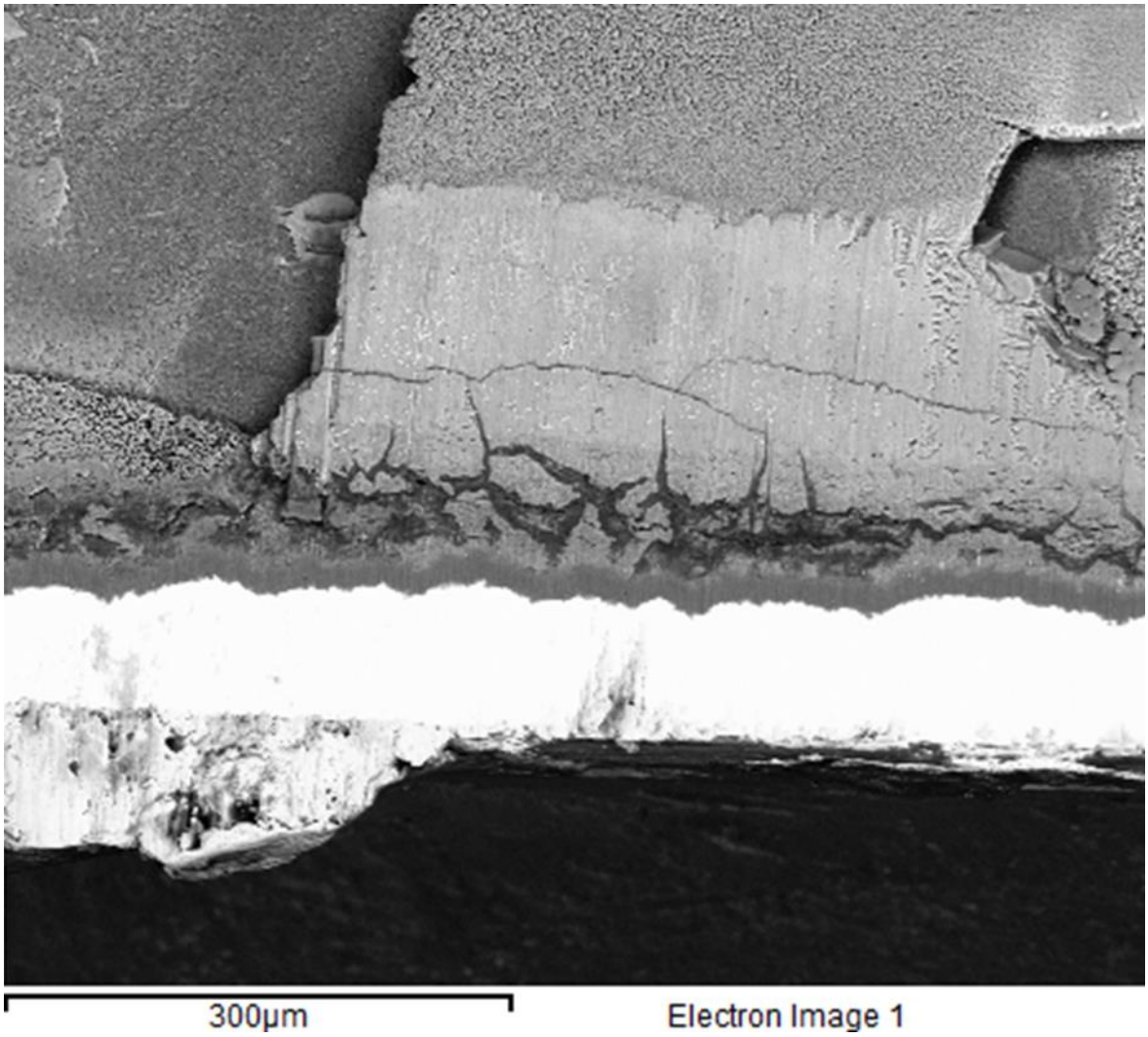


Fuente: Elaboración propia.

La presencia observada de Zinc (Zn) Azufre (S) y fósforo (P) nos confirma que nuestro aceite de corte tenía el aditivo de extrema presión esperado y era de la calidad adecuada.

Ahora nos aproximamos más a la zona del filo para estudiarla más en detalle:

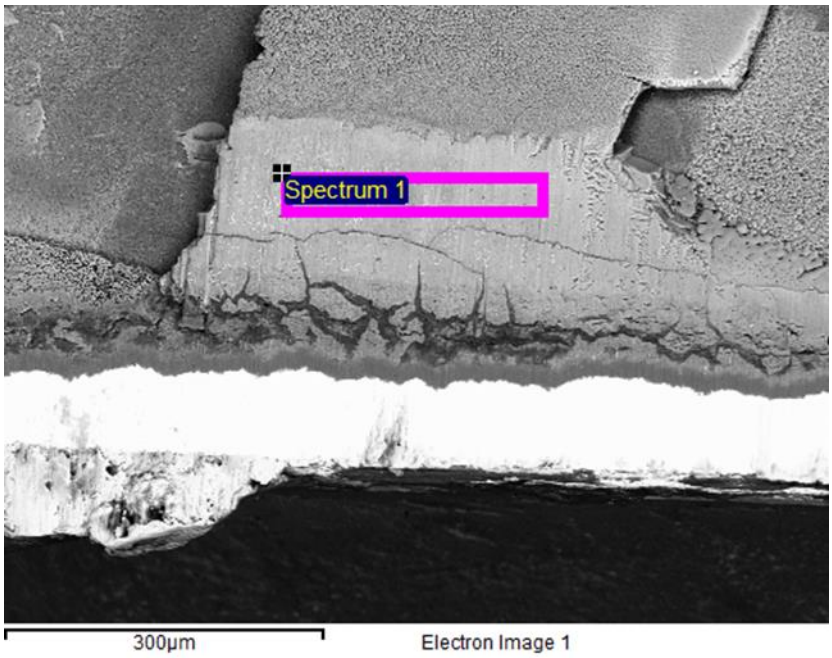
Figura 65 Zona del filo en la plaquita central.



Fuente: Elaboración propia.

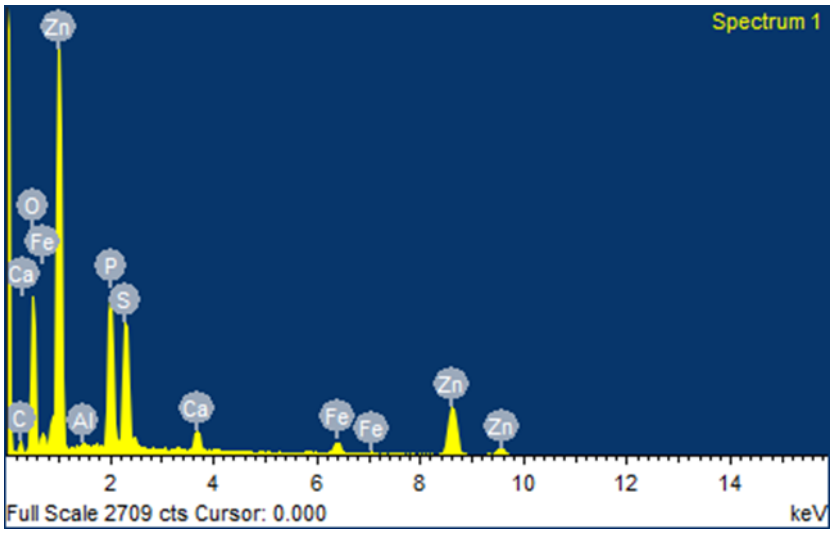
En esta zona muy próxima al filo, en su cara de incidencia, vemos que los restos del aceite de corte son más gruesos, lo que es lógico dada la más alta temperatura alcanzada allí en el corte.

Figura 66 Zona cercana al filo ha analizar la adhesión de fluido de corte.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 67 Resultado de microanálisis por rayos X (EDX o EDS) zona cercana al filo de la herramienta.



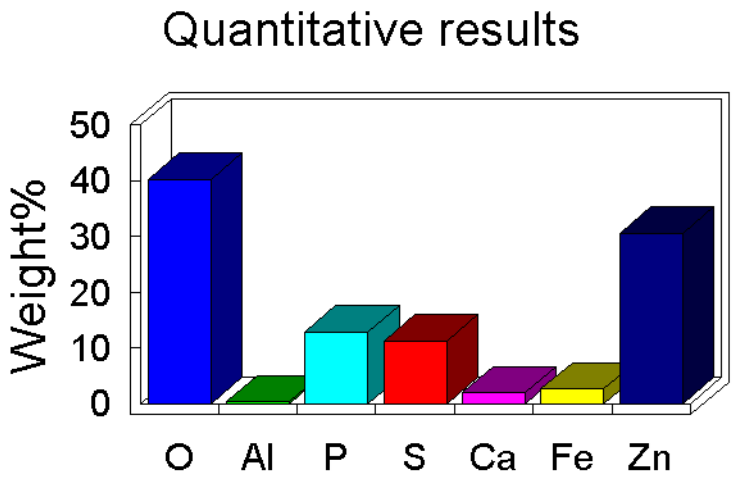
Fuente: Elaboración propia.

Figura 68 Tabla de resultados del microanálisis, zona cercana al filo de la herramienta.

Element	Weight%	Atomic%
O K	40.13	65.00
Al K	0.42	0.41
P K	12.84	10.74
S K	11.38	9.20
Ca K	2.01	1.30
Fe K	2.62	1.22
Zn K	30.60	12.13

Fuente: Elaboración propia.

Figura 69 Gráfico de resultados del microanálisis en una zona cercana al filo de la herramienta.



Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse en los resultados, la hipótesis de partida, que en la zona cercana al filo se adhiere aceite de corte por las altas temperaturas alcanzadas, es correcta.

Podemos afirmarlo puesto que en el microanálisis se puede observar la presencia de Zinc (Zn) Fósforo (P) y Azufre (S), que son los principales

componentes del aceite de corte que le confieren las propiedades de aceite de corte de extrema presión.

También vemos que, más cerca del filo, el contenido en oxígeno de los restos del aceite de corte se incrementa por las, cada vez, mayores temperaturas y consiguiente mayor oxidación (compárense las figuras 64 y 69).

6 Procesado posterior en los taladros de la placa tubular

6.1.1 Haz de tubos del generador de vapor nuclear

En la actualidad los tubos se fabrican con un material denominado ASME II Parte B SB-163 aleación 6690.

La fabricación del tubo comienza generalmente con la extrusión de una cáscara de un lingote y luego varias etapas de reducción en frío.

Ilustración 61 Colocación de los tubos de generador de vapor. Circuito primario.

Fuente: www.gettyimages.es.

Después, los tubos se pasan a través de las enderezadoras de rodillos para producir un producto recto. Este proceso produce una deformación plástica en el tubo, provocando algunas tensiones residuales.

Ilustración 62 tubos de generador de vapor. Circuito primario.

Fuente: www.gettyimages.es.

Al final del proceso de fabricación se realizan inspecciones visuales, con ultrasonidos y con corrientes inducidas, así como varias limpiezas. Después, los tubos rectos son doblados en forma de "U" con la configuración deseada.

6.2 Unión de los tubos a la placa tubular

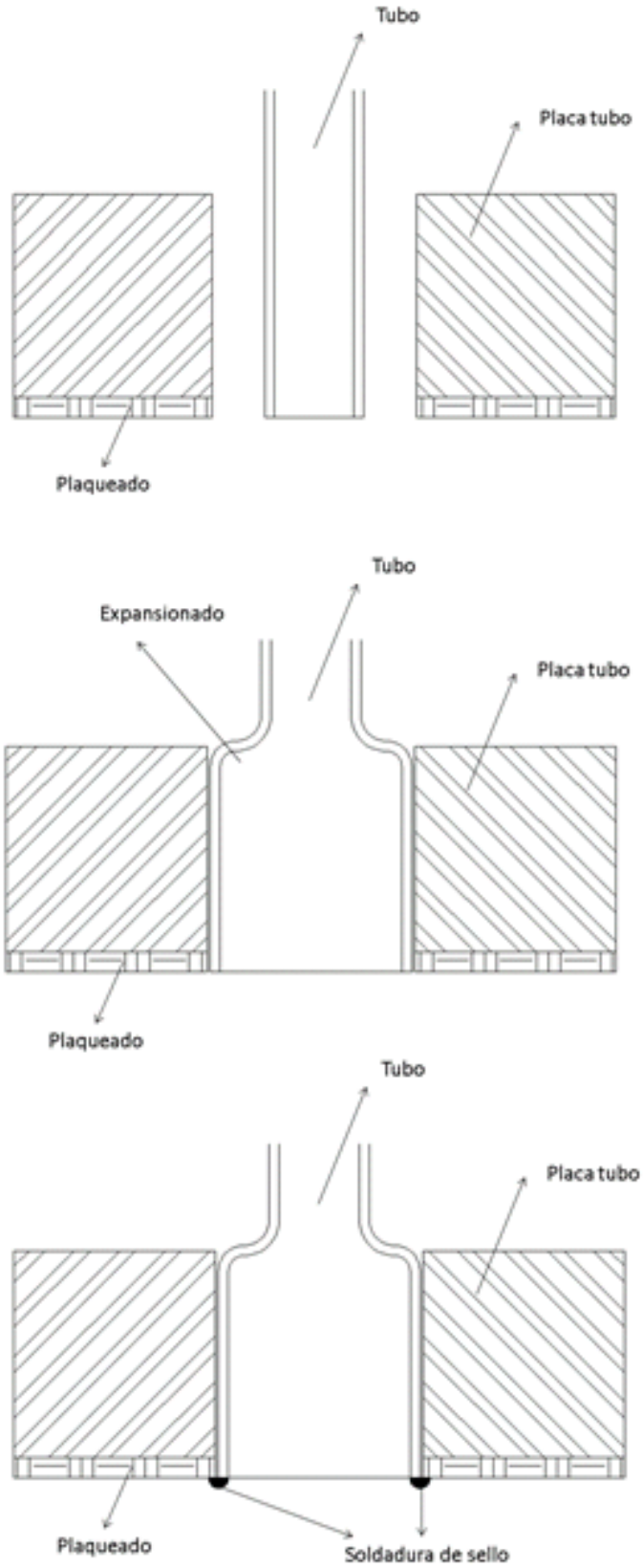
La unión de los tubos a la placa tubular, se realiza mediante la inserción de los mismos en ella durante el ensamblaje del generador de vapor y la posterior expansión para asegurar la inmovilidad de los mismos durante el funcionamiento en la planta. Los principales métodos de expansión de los tubos en la placa de los generadores de vapor son:

- Expansión con rodillo (Roll expansion): con una herramienta, el tubo se expande mecánicamente gracias a unos rodillos que presionan el tubo desde el interior. Puede causar estrés residual si los rodillos no cubren la superficie de forma uniforme.
- Expansión parcial con rodillo seguida de re-expansión total (Part Length Roll Followed by Re-Expansion to Full Depth): el tubo se expande con el método anterior para terminar de expandirlo,

normalmente durante la instalación del generador de vapor, con métodos explosivos, hidráulicos o por elastómeros.

- Expansión mecánica seguida de DAM (Mechanical Rolling Followed by Dudgeonnage Ameliore Mecaniquement (DAM)): consiste en una expansión por rodillo adicional a la longitud de expansión de la placa tubular, para reducir el estrés residual del proceso de expansión por rodillo.
- Expansión explosiva (Explosive Expansion): como su nombre indica, se usa un explosivo convencional para la expansión del tubo.
- Expansión Hidráulica: la expansión se produce mediante presión, la cual produce el expansionamiento de los tubos en la placa tubular.

Figura 70 Proceso de expansionado de los tubos.



Fuente: Elaboración propia.

Todos los métodos de expansión deforman plásticamente el tubo y por tanto producen estrés residual, que será mayor o menor dependiendo del método y de la correcta realización del mismo.

6.2.1 Soldadura de sello

Debido a la diferencia de presión existente entre el primario y el secundario, por la zona de unión entre los tubos puede pasar agua (radiactiva) del primario al secundario.
Para evitar esto se sueldan los tubos a la placa tubular.
La función de ésta soldadura es mantener la estanqueidad y mantener solidarios los tubos a la placa tubular.
Una vez realizada la soldadura se llevan a cabo controles sobre la misma para garantizar la calidad de la soldadura, mediante pruebas de helio.
Para que la soldadura sea homogénea los materiales del plaqueado de la placa tubular y el de los tubos son una aleación de níquel similar.

6.3 Mecanismos de degradación de los tubos

6.3.1 Acumulación de lodos

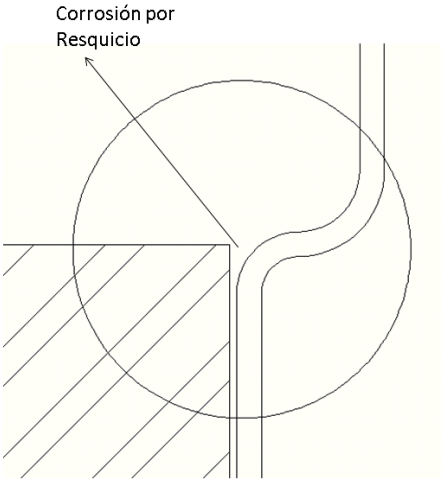
Debido al flujo de agua se acumulan sedimentos y lodos en el fondo de generador de vapor, sobre la placa tubular.
Estos lodos han de retirarse periódicamente para evitar problemas de corrosión.
La limpieza de los lodos se lleva a cabo mediante lanzas que se introducen por los tubos de lanzas, y se inyecta agua a presión.

6.3.2 Corrosión en resquicio

Cuando se produce el expansionado del tubo hay que procurar que el espacio entre la placa tubular y el tubo sin expansionar sea el mínimo posible puesto que en esa zona se acumula agua. Esa acumulación de residuos produce corrosión en resquicio.

Para evitar esto se debe minimizar ese espacio, para ello se debe garantizar en lo posible, que el expansionado de los tubos ocupe todo el espesor de la placa tubular.

Figura 71 Detalle hueco entre placa tubular y tubo, después del expansionado.



Fuente: Elaboración propia.

6.4 Reparación del tubo

Todos los defectos que hemos visto en el apartado anterior se traducen en la progresiva inutilización de los tubos. La inspección de los tubos determina cuales de ellos están afectados y las soluciones principales adoptadas son:

- Taponado: Lo que elimina la posibilidad de escape de agua del primario al secundario, pero reduce la superficie de contacto entre los dos fluidos y, por tanto, la capacidad de transmisión de calor del generador de vapor.
- Enmanguitado: Introducción de manguitos metálicos en el interior de los tubos afectados, que posteriormente son fijados mediante procesos de expansionado y soldado, evitando así la pérdida del tubo.

El porcentaje máximo de los tubos que se pueden llegar taponar es del 10 %. Éste numero ha sido seleccionado por las siguientes razones:

- Es un valor de diseño conservador, ya que el 10% del taponado sólo se alcanzaría si tuviese lugar un mecanismo de fallo sistemático de tubos.
- El margen de la superficie de transferencia de calor (aproximadamente un 10 %), asociado con el 10% de margen del taponado, se puede usar alternativamente como margen de ensuciamiento.
- El número del 10% de taponado de tubos es un valor común para determinar el caudal de diseño térmico asociado a una caída de presión incrementada del lado primario del generador de vapor.

7 Bibliografía

Airey, G., Vaia, A., & Aspden, R. (1981). Nuclear technology. A stress corrosion cracking evaluation of inconel 690 for steam generator tubing applications.

ASME, boiler and pressure vessel code. (2015).

C. d. (1990). *Dosis colectiva en los trabajos de recarga de las centrales nucleares españolas en el año 1990.*

Capó, J. V. (Septiembre 2005). Programa de mantenimiento de los generadores de vapor de centrales de agua a presión.

Casbas, J. L. (s.f.). *Herramientas de corte. Caraterísticas y aplicaciones*. Recuperado el 13 de Marzo de 2017, de http://taladradoprofundo.blogspot.com.es/

Comité sobre la seguridad de las instalaciones nucleares. (1984). *Specialist meeting on operating experience with steam generators.*

Comité sobre la seguridad de las instalaciones nucleares. (1997). *Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Steam generators.* Technical Repot IAEA-TECDOC 981.

Consejo de Seguridad Nuclear. (1993). *Generadores de vapor. Descripción, problemática y perspectivas.* Madrid.

Dorta, Y. P. (s.f.). *Desarrollo histórico de los generadores de vapor en las centrales nucleares.* Recuperado el 5 de Marzo de 2017, de www.monografías.es: http://www.monografias.com/trabajos15/centr-nucleares/centr-nucleares.shtml

Educypedia. (2007). *educypedia.* Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de http://educypedia.karadimov.info/library/npp1.pdf

Estrada, J. M. (2001). *Diseño y cálculo de recipientes a presión.*

G.Hestroni, S. y. (1995). En *PWR steam generators* (págs. 1-97).

Huber, R. (2009). *Steam Generator Replacement Projects Ringhals Unit 2 to Unit 4. In IAEA Technical Meeting on Heavy Components Replacement in Nuclear Power Plants.*

M.G.C., P., & K., T. (Mayo de 1980). Recuperado el 7 de Marzo de 2017, de www.sc.ehu.es: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/tension/capilar/capilar.htm

Mendez, A., Sandoval, E., Rodriguez, J. A., & Berrios, S. (Febrero 2015). En *Programa de mantenimineto de los generadores de vapor de las centrales de agua a presión* (págs. 6-14).

N. R. (11 de Febrero de 2013). *nrc*. Recuperado el 25 de Febrero de 2017, de http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html

Navamuel, R. M. (2 Octubre 2009). Cualificación y certificación de suministros según ASME III NCA 3000.

Nuclearinfo. (2014). *nuclearinfo.net*. Recuperado el 28 de Febrero de 2017, de http://nuclearinfo.net/Nuclearpower/WebHomeSafetyOfNuclearPowerPlants

Orellana, M. A. (s.f.). *Recipientes de pared delgada.* Recuperado el 10 de Marzo de 2017, de docentes.uto.edu.bo: http://docentes.uto.edu.bo/mruizo/wp-content/uploads/CAP6_RECIPIENTES_DE_PARED_DELGADA.pdf

Revuleta, R. R. (27 Enero 2009). *Placa soporte de tubos de un generador de vapor nuclear: Propiedades equivalentes, análisis térmico y estructural.*

Riznic, J. R. (Mayo de 2011). *www.sciencedirect.com.* Recuperado el 3 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549311000082

Sandvik. (2015). *Product catalog and application guide.*

Sandvik. (2016). *Product catalog and application guide.*

TAURUS. (s.f.). *DHMS, Multiple Spindle Deep-Hole Drilling Machine*. Recuperado el 15 de Marzo de 2017, de http://tarus.com/project/dhms-multiple-spindle-deep-hole-drilling-machine/

Unidos, C. R. (23 Octubre 2000). *Reporte técnico de la NRC.*

UNISING. (s.f.). *About BTA deep hole drilling*. Recuperado el 4 de Marzo de 2017, de http://www.unisig.com/information-and-resources/what-is-deep-hole-drilling/what-is-bta-drilling/

UNISING. (s.f.). *Gundrill process and specifications*. Recuperado el 8 de Marzo de 2017, de http://www.unisig.com/information-and-resources/what-is-deep-hole-drilling/what-is-gun-drilling/

Vargas, G. J. (2012). Análisis integrado de seguridad de un accidente SGTR en un reactor nuclear tipo PWR. En G. J. Vargas.

Vidal, J. C. (Septiembre 2005). Programa de mantenimiento de los generadores de vapor de las centrales de agua a presión.

W. N. (Marzo de 2014). *World Nuclear Association*. Recuperado el 15 de Febrero de 2017, de http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx

Wikipedia. (s.f.). *Soldadura fuerte*. Recuperado el 16 de Marzo de 2017, de https://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_fuerte

Wikipedia. (s.f.). *Taladrado profundo*. Recuperado el 15 de Marzo de 2017, de www.wikipedia.org: https://es.wikipedia.org/wiki/Taladrado_profundo

Wikipedia. (s.f.). *www.wikipedia.org*. Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de https://es.wikipedia.org/wiki/Mecanizado#Mecanizado_por_arranque_de_viruta

World Nuclear News. (1 de Febrero de 2014). US steam generator replacement a winner.