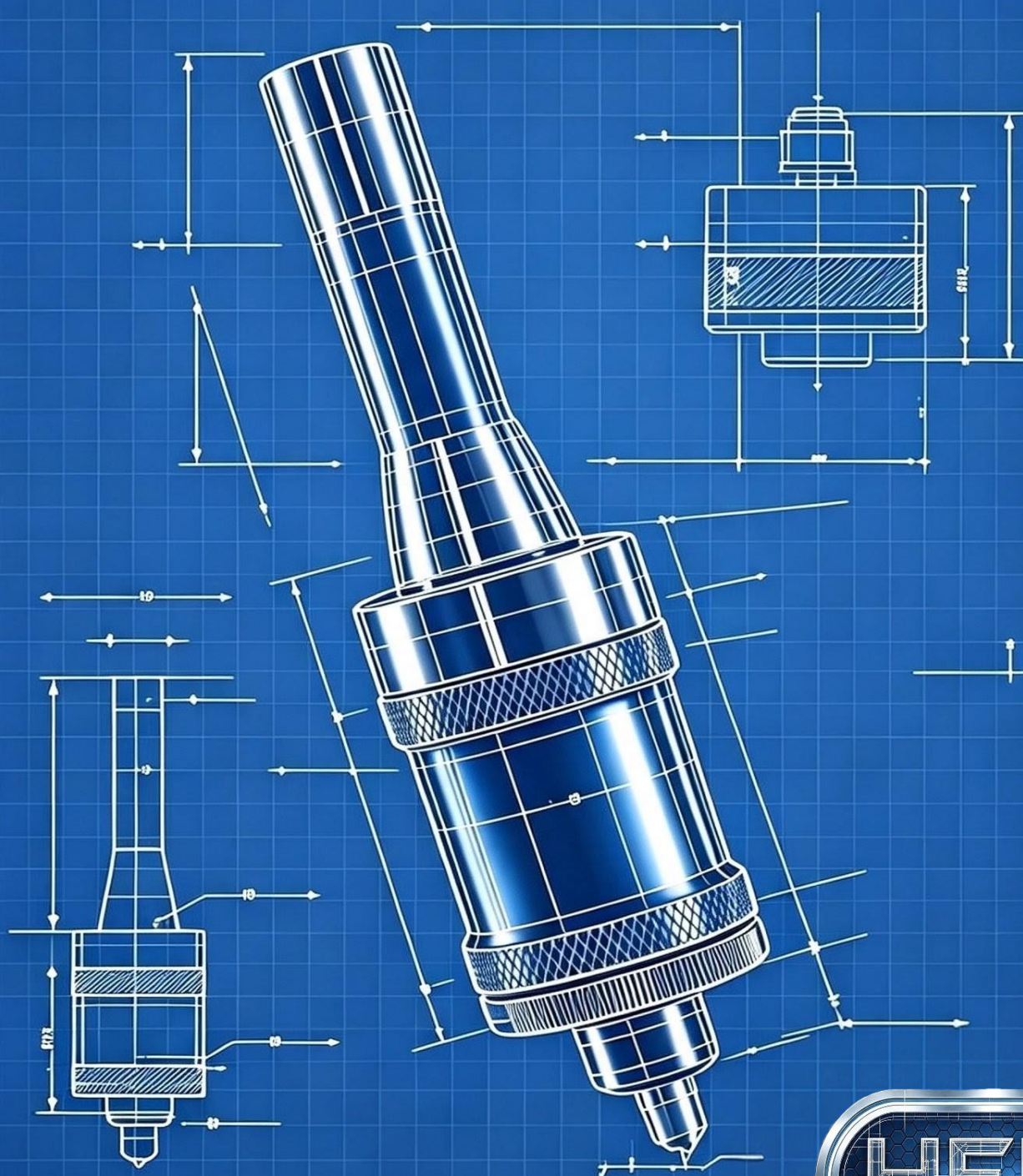


Manual Técnico de Ingeniería y Operación SynchroBroach Modular





HEIN® HERRAMIENTAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MANUFACTURA Y TRIBOLOGÍA

Manual Técnico de Ingeniería y Operación Industrial

Dinámica de Operación, Modelado de Carga Combinada y Compatibilidad del Sistema SynchroBroach Modular

ÁREA TÉCNICA: Procesos de Mecanizado por Deformación y Caracterización Tribológica

DOCUMENTO CORPORATIVO: MN-HEIN-SRB-2026-REV07

ESTANDARIZACIÓN INDUSTRIAL: Magnitudes Físicas según ISO 80000-4, ISO 1832 e ISO 513

CONFORMIDAD DE CALIDAD: Estándar de Alto Nivel de Ingeniería Mecánica

DERECHOS RESERVADOS: © 2026 HEIN. Propiedad Intelectual Industrial. Copia Controlada.

PRESENTACIÓN INSTITUCIONAL

El Departamento de Ingeniería de Manufactura y Tribología de HEIN Herramientas Industriales somete a disposición de la comunidad de manufactura avanzada, ingenieros de procesos, programadores CNC y directores de operaciones de la alta industria, el presente cuerpo de conocimiento para la toma de decisiones críticas en el taller de maquinado y estaciones de alta producción.

En un entorno global altamente competitivo, la optimización de los recursos mecánicos, el control de la inercia rotacional y la supresión de fallas imprevistas en la interfaz de corte definen la rentabilidad real de las líneas de producción automatizadas. Este documento constituye un compendio científico que formaliza la física de la rodadura libre sincrónica y el brochado por oscilación forzada, vinculando las constantes de resistencia de materiales con la cinemática de los cabezales de la serie SynchroBroach.



ÍNDICE GENERAL DEL MANUAL

Manual técnico de ingeniería y operación industrial	2
<i>Dinámica de operación, modelado de carga combinada y compatibilidad del sistema synchrobroach modular</i>	2
Presentación institucional	2
índice general del manual	3
introducción	4
1. Filosofía de operación y propuesta de valor industrial	4
2. Fundamentos cinemáticos, vectores de fuerza y comportamiento en cnc	5
3. Arquitectura modular, clasificación de zancos e interfaz posterior	6
4. Criterios de selección de la herramienta (línea hein hexaforce m2)	7
5. Modelado matemático y ecuaciones fundamentales de carga combinada	7
6. Ingeniería de la geometría previa (pre-drill), alivio y chaflán de acoplamiento	9
6.1 Especificación del barrenado previo (d_b)	10
6.2 Profundidad de la cámara de sacrificio (l_c)	10
6.3 Chaflán de entrada y acoplamiento cinemático (d_c)	10
7. Cinemática operativa: velocidades de corte y avances (feed / speed)	10
7.1 Sincronización del vector de avance lineal cnc y convencional.	11
8. Tribología de la interfaz, especificación de fluidos y extrema presión	11
9. Protocolo de alineación metrológica y límites críticos de descentramiento (runout)	12
10. Matriz de diagnóstico visual de modos de falla y resolución de problemas ...	12
11. Requerimientos de potencia neta y límites de rigidez estructural	13
11.1 Estimación de fuerza axial mínima (f_a)	13
11.2 Límites estructurales del sistema según interfaz de husillo	14
12. Caracterización de desgaste de la arista y manejo de residuos	14
12.1 Criterios de desecho y control de vida útil de la brocha	14
12.2 Disposición de residuos metalúrgicos y cumplimiento ambiental	14
13. Protocolos de seguridad industrial ante fluidos de alta presión	15
14. Exclusión de responsabilidad y términos legales de operación	15



INTRODUCCIÓN

En el mecanizado industrial moderno, la interfaz de deformación y corte por oscilación constituye un sistema termodinámico cerrado de alta severidad tribológica. La selección precisa de la combinación entre el herramienta basculante, el sustrato metalúrgico del consumible, la geometría del barreno previo y las microgeometrías de los vértices define de manera directa la eficiencia volumétrica de remoción, el control geométrico del perfil poligonal interno y la prevención de fallas catastróficas imprevistas.

La codificación de las interfaces modulares y las tolerancias de acoplamiento del sistema se rigen estrictamente por lo estipulado en las normas internacionales **ISO 1832** e **ISO 513**, garantizando la intercambiabilidad global del herramienta tanto en tornos convencionales como en centros de mecanizado CNC de ejes múltiples.

1. FILOSOFÍA DE OPERACIÓN Y PROPUESTA DE VALOR INDUSTRIAL

En el régimen de la manufactura en serie y alta producción, la interacción en la interfaz de conformado interactúa directamente con la tasa de amortización de los activos de capital y la eficiencia general de los equipos (OEE). El sistema modular **HEIN® SynchroBroach** constituye una unidad cinemática de manufactura integrada. Su diseño estructural de alta ingeniería está rigurosamente calculado para superar el esfuerzo de fluencia destructivo y la resistencia al corte de aleaciones de alta tenacidad, suprimiendo de forma absoluta los tiempos improductivos asociados al conformado de perfiles geométricos internos o externos de simetría poligonal compleja.

Las tecnologías de maquinado convencional por trayectoria unitaria (tales como el ranurado o *slotting* lineal, la interpolación helicoidal mediante fresado CNC o la electroerosión por penetración EDM) imponen restricciones operativas severas. Estas limitaciones se manifiestan en altas tasas de desgaste prematuro por fatiga térmica, tiempos de configuración prolongados y costos por pieza críticamente elevados.

El sistema **HEIN® SynchroBroach** elimina las variables de ajuste en piso mediante un principio de posicionamiento concéntrico de acoplamiento rígido directo. Al integrar el dispositivo modular con los elementos de corte de la serie **HEIN® HexaForce M2**, se vectoriza la fuerza axial de avance del husillo, transformando la carga lineal en una acción de corte continuo y progresivo. Este diseño reduce la demanda energética por remoción volumétrica de viruta y optimiza de forma medible el retorno de inversión (ROI) en plataformas tanto convencionales como CNC multifuncionales.

2. FUNDAMENTOS CINEMÁTICOS, VECTORES DE FUERZA Y COMPORTAMIENTO EN CNC

El principio operativo del brochado rotativo se fundamenta en una desalineación angular constante e intencional (α) de 1.0° introducida en el eje oscilante central del dispositivo respecto al eje de simetría axial de la pieza de trabajo. Esta desviación geométrica descompone el vector de avance lineal del husillo principal en una fuerza tangencial efectiva (F_c) y una fuerza radial de separación (F_r). El fenómeno induce una rodadura libre sincrónica acoplada a un esfuerzo cortante oscilatorio localizado en la zona de contacto primario. Durante la cinemática de penetración, la transferencia de carga no ocurre de forma simultánea en todo el contorno de la herramienta; el ataque se restringe secuencialmente a un solo vértice o segmento de la arista de corte.

Al eliminar el área de contacto total instantánea, el par torsor reactivo disminuye significativamente. Esto mitiga las vibraciones armónicas regenerativas (*chatter*) y distribuye de manera uniforme las tensiones mecánicas. Como resultado, se posibilita el maquinado de cavidades complejas con un consumo de potencia neta en el husillo menor al requerido por los métodos de corte convencionales.

Dinámica según el Entorno de Maquinado y Versatilidad de Procesos:

- Operación en Tornos Convencionales (Paralelos, Revólver y Verticales):**
 La carcasa exterior y el zanco modular se montan de forma rígida y estática en el contrapunto, en la torreta portaherramientas o en el carro transversal. Al avanzar linealmente mediante el desplazamiento manual o automático del carro y hacer contacto mecánico con la pieza en rotación fijada en el mandril, el cabezal interno inicia su movimiento oscilatorio libre. La brocha se sincroniza instantáneamente con la velocidad angular del plato ($N_1 = N_2$), labrando la geometría interna de forma continua.
- Operación en Maquinaria Convencional Rotativa (Taladros de Columna, Taladros Radiales, Fresadoras Verticales y Universales):**
 El conjunto completo del dispositivo, acoplado mediante el zanco adaptador correspondiente (Cono Morse o R8), rota a las revoluciones por minuto (RPM) seleccionadas en la caja de velocidades de la máquina. En el instante en que las aristas de corte frontales intersecan la superficie de la pieza de trabajo (la cual permanece estática en una prensa de sujeción o mesa de trabajo), la resistencia por fricción detiene la rotación del cabezal interno logrando el acoplamiento mecánico. A partir de este punto, la carcasa externa continúa girando a la velocidad nominal del husillo mientras el eje ejecuta la oscilación sincrónica confinada por el ángulo α , penetrando el material mediante el avance manual o el avance automático.
- Operación en Centros de Maquinado y Tornos de Control Numérico (Centros de Maquinado CNC de ejes múltiples, Tornos CNC con herramientas vivas y Centros de Torneado-Fresado (Turn-Mill)):**
 El sistema aprovecha su arquitectura síncrona para integrarse a los ciclos de interpolación y avances programados. El dispositivo rota inicialmente a las RPM de diseño y detiene su cabezal interno por fricción contra la pieza estática (en fresadoras), o viceversa (en tornos CNC), ejecutando una trayectoria axial controlada por servomotores con una precisión repetible de posicionamiento indexado.



3. ARQUITECTURA MODULAR, CLASIFICACIÓN DE ZANCOS E INTERFAZ POSTERIOR

La sección de acoplamiento posterior del dispositivo incorpora una interfaz roscada hembra estandarizada de 1-1/2" x 18 UNF (clase de ajuste 2B), diseñada específicamente para recibir cualquier árbol o zanco adaptador roscado macho compatible. Esta arquitectura modular dota al sistema de una compatibilidad universal, permitiendo la migración inmediata del dispositivo entre estaciones de manufactura avanzada CNC y áreas de maquinado convencional mediante el simple intercambio del zanco de sujeción, garantizando en todos los casos una alta rigidez estructural y la eliminación de desviaciones por descentramiento axial (*runout*).

El cuerpo principal basculante de la carcasa exterior está manufacturado a partir de barra sólida de una **aleación de aluminio de grado aeroespacial de ultra alta resistencia**, seleccionada para reducir la inercia rotacional en arranques CNC y proteger contra la corrosión de fluidos sintéticos mediante un acabado de anodizado azul de alta densidad. El porta-brochas (eje oscilante central) está fabricado en su totalidad a partir de un **acero de alta ingeniería bonificado de núcleo templado y revenido** controlado en atmósfera protegida para alcanzar una dureza estructural extrema y homogénea de 43 a 48 HRC, lo que confiere una tenacidad masiva contra la fatiga elástica bajo severas fuerzas de penetración lineal.

Tipo de Zanco Modular	Aplicación Cinemática	Método de Retención	Rigidez Estructural
Weldon (Cilíndrico)	Tornos CNC / Portaherramientas (ISO 9766)	Opresión Tangencial	Extrema (h6)
Cono Morse (MT)	Contrapunto de Torno / Taladro (ISO 296)	Interferencia Cónica Alta (MT2-MT5)	
Cono R8	Fresadora Vertical Convencional	Barra de Tiro Posterior	Media-Alta
CAT / BT / ISO	Centros de Maquinado CNC (ISO 7388-1)	Perno de Retención de Alta Tensión	Máxima

3.1 Restricción de Montaje Rígido e Integridad Torsional (ISO 5864 / ASME B1.1):

El acoplamiento roscado de la interfaz posterior modular macho de 1-1/2" x 18 UNF-2A exige un procedimiento de precarga axial controlado para mitigar la fatiga por esfuerzos cíclicos flexotorsionales. Queda estrictamente prohibido el uso de herramientas de impacto neumático o manual para el apriete del zanco adaptador. Se debe utilizar una llave dinamométrica calibrada (conforme a la norma ISO 6789) aplicando un torque nominal de 135 N·m ($\pm 5\%$) empleando una película microfina de MoS₂ en los hilos. Un par incorrecto provocará micro-desplazamientos radiales destructivos o la elongación plástica de la rosca..



4. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA (LÍNEA HEIN HEXAFORCE M2)

La selección del consumible de corte se determina en función de la geometría nominal del perfil poligonal requerido y las dimensiones del alojamiento concéntrico rectificado de **0.500 in (12.70 mm)** del cabezal. Este alojamiento cuenta con una tolerancia de ajuste y un sistema de bloqueo tangencial mediante opresor de alta resistencia grado 12.9 (ISO 4026).

Las herramientas de la línea **HEIN® HexaForce M2** se fabrican en un **acero de alta velocidad para herramientas aleado con tungsteno, molibdeno y vanadio**. El material se somete a un ciclo de tratamiento térmico que incluye temple austenítico, triple revenido selectivo y un proceso metalúrgico de relevado de esfuerzos residuales, alcanzando una dureza superficial homogénea de **64.0 HRC** para anular la microfisuración.

Código HEIN	Dimensión Nominal	Zanco Sujeción	Normativa
H-BH-0187	3/16" (0.1875 in)	0.500 in (12.70 mm)	ANSI B18.3 / ISO h6
H-BH-0250	1/4" (0.2500 in)	0.500 in (12.70 mm)	ANSI B18.3 / ISO h6
H-BH-0312	5/16" (0.3125 in)	0.500 in (12.70 mm)	ANSI B18.3 / ISO h6
H-BH-0375	3/8" (0.3750 in)	0.500 in (12.70 mm)	ANSI B18.3 / ISO h6
H-BH-0500	1/2" (0.5000 in)	0.500 in (12.70 mm)	ANSI B18.3 / ISO h6

4.1 MECÁNICA DE FIJACIÓN TANGENCIAL DEL ZANCO CILÍNDRICO (ISO 4026 / DIN 913):

La transmisión del torque reactivo industrial (T) desde el eje oscilante central hacia el zanco rectificado de la brocha HEIN HexaForce M2, se efectúa mediante un acoplamiento por fricción y cuña debido a un opresor de punta plana normalizado **ISO 4026 grado 12.9** de alta resistencia. El torque de apriete del opresor mediante la llave Allen industrial suministrada debe ser de **12 N·m** estrictos. Queda prohibido el uso de brochas con planos Weldon modificados empíricamente en taller, ya que reducen el área neta disipadora (A_{net}) y desplazan la brocha fuera del eje neutro incrementando de forma destructivo el runout dinámico.

5. MODELADO MATEMÁTICO Y ECUACIONES FUNDAMENTALES DE CARGA COMBINADA

El eje central oscilante, manufacturado en un **acero de alta ingeniería bonificado de núcleo templado y revenido** (Módulo de Elasticidad $E = 205$ GPa, Límite de Fluencia Estructural Promedio $S_y = 980$ MPa), experimenta solicitaciones complejas por esfuerzos combinados derivados de la acción simultánea de la fuerza axial neta de penetración lineal (F_a) y el momento flexionante cíclico (M) debido a la desalineación cinemática angular $\alpha = 1.0^\circ$ evaluado a una distancia de brazo de palanca fija ($L_{contacto}$).

El estado de esfuerzo normal combinado total (σ_{total}) en la sección crítica del rodamiento de empuje se rige estrictamente por lo estipulado en la norma internacional **ISO 80000-4 (Mecánica)** mediante el siguiente modelo analítico de carga:

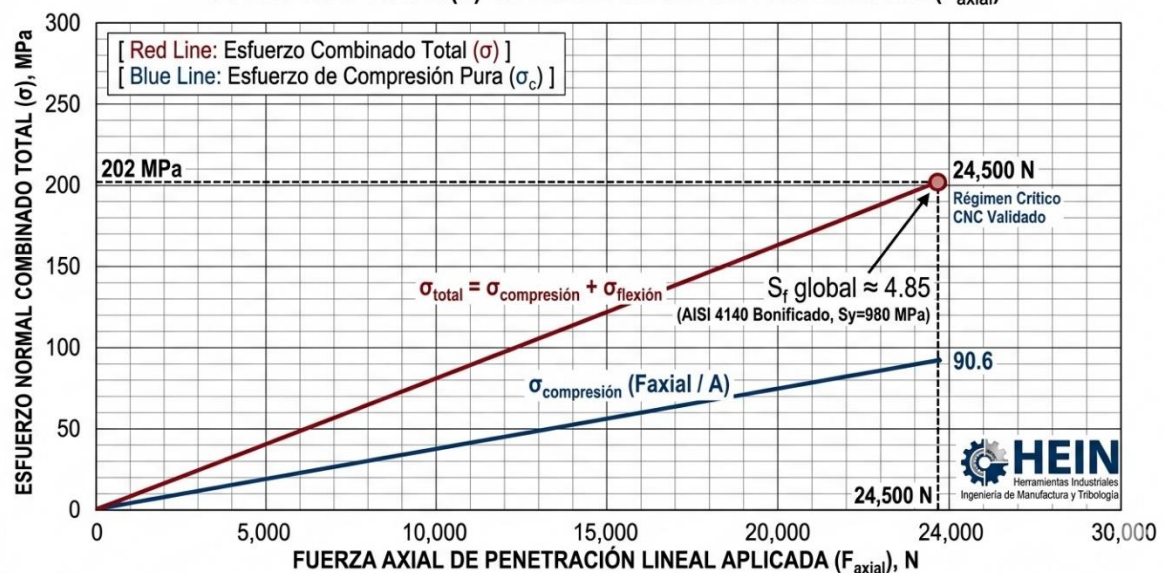
$$\sigma_{compresión} = Fa / A \quad [\text{Donde: } A = (\pi \cdot d^2) / 4]$$

$$M = Fa \cdot \sin(\alpha) \cdot L_{contacto} \quad [\text{Donde: } L_{contacto} = 26.05 \text{ mm}]$$

$$\sigma_{flexión} = (M \cdot c) / I \quad [\text{Donde: } I = (\pi \cdot d^4) / 64 \text{ e } c = d / 2]$$

$$\sigma_{total} = \sigma_{compresión} + \sigma_{flexión}$$

FIGURA 5.1: CABEZAL SYNCHROBROACH - ANÁLISIS DINÁMICO DE ESFUERZO NORMAL COMBINADO TOTAL (σ) vs. FUERZA AXIAL DE PENETRACIÓN (F_{axial})



Bajo condiciones de máxima sollicitación mecánica en control CNC (con una fuerza límite nominal de $F_a = 24\,500 \text{ N}$), el sistema registra un esfuerzo por compresión pura de $\sigma_{compresión} = 90.6 \text{ MPa}$ y un esfuerzo por flexión de $\sigma_{flexión} = 111.4 \text{ MPa}$, arrojando un esfuerzo combinado real de **$\sigma_{total} = 202.00 \text{ MPa}$** . El dispositivo opera de forma holgada con un Factor de Seguridad estructural dinámico global de **$S_f = 4.85$**

Por su parte, el cuerpo cilíndrico de la brocha de conformado (fabricada en el supracitado acero de alta velocidad para herramientas aleado con tungsteno, molibdeno y vanadio a 64 HRC nominal, Módulo de corte $G = 82.0 \text{ GPa}$, Límite elástico $S_y = 1\,650 \text{ MPa}$) experimenta compresión axial elástica y un esfuerzo cortante torsional máximo periférico (τ_{max}) debido al par tórsor reactivo industrial (T) transmitido por el acoplamiento oscilante durante el corte.

El criterio de falla por energía de distorsión elástica de Von Mises se modela formalmente mediante la siguiente interacción constitutiva de cargas conforme a la norma ISO 80000-4:

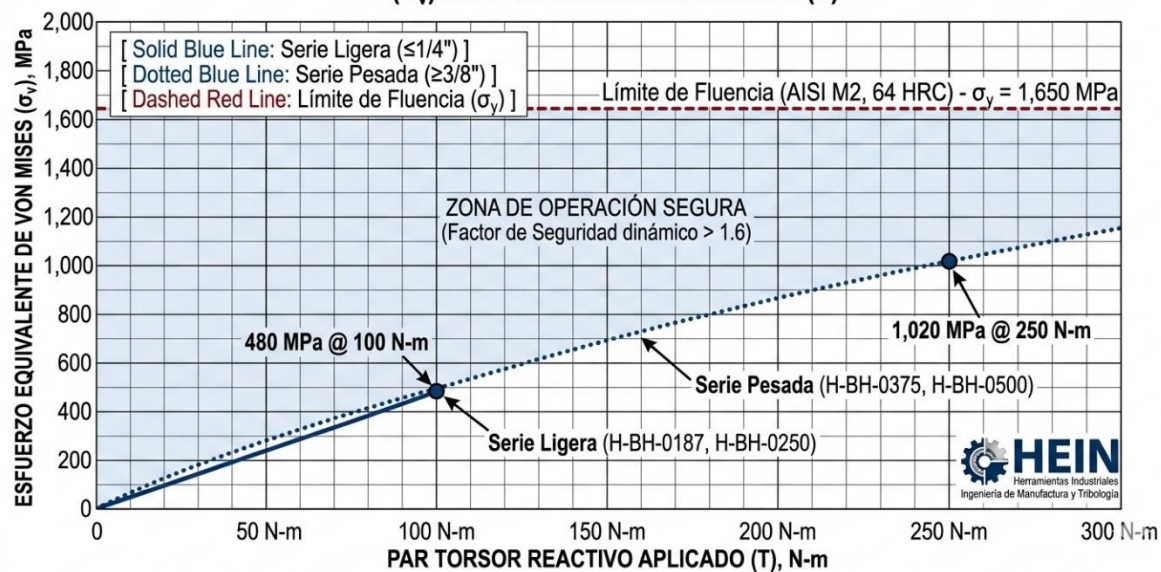
$$\sigma_x = F_a / A_n \quad [\text{Donde: } A_n = (\pi \cdot d^2) / 4]$$

$$\tau_{max} = (T \cdot c) / J \quad [\text{Donde: } J = (\pi \cdot d^4) / 32 ; c = d / 2]$$

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_x)^2 + 3 \cdot (\tau_{max})^2}$$

Con un esfuerzo cortante de fluencia admisible verificado de $\tau_v = 952.0 \text{ MPa}$, la herramienta disipa las tensiones de corte a lo largo de su sección maciza, eliminando por completo el riesgo de deformaciones permanentes, microfisuras o descascarillamiento del filo cortante periférico.

FIGURA 5.2: BROCHA HEXAFORCE M2 - ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE VON MISES (σ_v) vs. PAR TORSOR REACTIVO (T)



6. INGENIERÍA DE LA GEOMETRÍA PREVIA (PRE-DRILL), ALIVIO Y CHAFLÁN DE ACOPLAMIENTO

El éxito cinemático del brochado rotativo depende de la preparación geométrica rigurosa del barreno previo. Debido a que las herramientas HEIN HexaForce M2 operan por deformación y corte confinado sin evacuación helicoidal de rebaba, la viruta desprendida se compacta de forma puramente axial hacia el fondo de la cavidad. Para neutralizar cualquier inestabilidad espacial o colapso estructural de la arista, se establecen los siguientes criterios de control de fronteras geométricas:



6.1 Especificación del Barreno Previo (D_b)

Para evitar la colisión periférica severa de las caras planas de la brocha contra las paredes del cilindro, el diámetro del barreno previo (D_b) debe ser mayor al diámetro del círculo inscrito (D_{ic}) del perfil poligonal. Se establece la siguiente condición de control inecuacional conforme a los criterios metrológicos:

$$D_{ic} + 0.05 \text{ mm} \leq D_b \leq D_{ic} + 0.10 \text{ mm}$$

Un diámetro menor a este límite induce sobrecarga mecánica por fricción lateral secundaria, provocando el astillamiento instantáneo de los vértices frontales del inserto por cizallamiento severo.

6.2 Profundidad de la Cámara de Sacrificio (L_c)

La profundidad total del barreno previo ejecutado debe superar la longitud efectiva de brochado (L_e) para alojar el volumen de material desalojado. Se impone la siguiente restricción geométrica lineal:

$$L_c \geq 0.35 \cdot L_e$$

Fórmulas de volumen excedente demuestran que un espacio menor a este porcentaje genera una compresión hidráulica masiva de la viruta compactada en el fondo, rompiendo la sección transversal de la brocha por esfuerzo de tracción reactivo.

6.3 Chaflán de Entrada y Acoplamiento Cinemático (D_c)

Para garantizar una sincronización angular instantánea entre la brocha y la pieza en movimiento, es estrictamente obligatorio maquinar un chaflán cónico de entrada a 45.0° exactos en la cara frontal del barreno previo:

$$D_c > D_{cc}$$

Donde D_{cc} representa el diámetro del círculo circunscrito (punta a punta) de la geometría del perfil de la brocha. Si el diámetro del chaflán es menor al círculo circunscrito, la brocha experimentará un desfase de indexación, desplazándose radialmente (efecto de caminado elástico) y destruyendo los vértices frontales de la herramienta de forma inmediata.

7. CINEMÁTICA OPERATIVA: VELOCIDADES DE CORTE Y AVANCES (FEED / SPEED)

Las variables, unidades y relaciones cinemáticas se encuadran estrictamente bajo la clasificación de grupos de aplicación de la norma **ISO 513**. La transformación de la velocidad de corte lineal parametrizada a la velocidad angular requerida en el husillo se calcula empleando el diámetro del círculo circunscrito (D_{cc}) de la geometría de la brocha en la siguiente relación lineal constitutiva según la norma **ISO 80000-4**:

$$n = (vc \cdot 1000) / (\pi \cdot D_{cc})$$

- **Fundamento Técnico:** El brochado rotativo exige avances por revolución extremadamente altos (hasta 10 veces superiores al taladrado convencional) debido a que la herramienta corta por penetración progresiva de un solo vértice a la vez, requiriendo un "paso cinemático" mínimo para estabilizar el cabezal oscilante.

Grupo de Material ISO	Familia de Aleaciones Típicas	Dureza / Resistencia Brinell	Velocidad de Corte Mínima (v_c)	Rango de Avance Recomendado (f_n)
ISO P (Aceros)	Aceros al carbono, aleados y herramientas (AISI 1045, 4140, D2)	< 280 HB / < 950 MPa	20 a 35 m/min	0.08 a 0.25 mm/rev
ISO M (Inoxidables)	Aceros inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex (AISI 304, 316)	< 230 HB / < 750 MPa	15 a 25 m/min	0.06 a 0.18 mm/rev
ISO K (Fundiciones)	Fundición gris, nodular y maleable	< 250 HB	25 a 40 m/min	0.10 a 0.30 mm/rev
ISO S (Superalaciones)	Aleaciones de Titanio y base Níquel (Inconel 718, Ti-6Al-4V)	< 350 HB / < 1200 MPa	8 a 15 m/min	0.04 a 0.12 mm/rev

Nota metrológica: Si el operador trabaja en **maquinaria convencional** (fresadoras universales o taladros de columna) que no disponga de avance automático decimal fino, se debe seleccionar el escalón de avance mecánico más cercano, priorizando siempre mantener una velocidad de corte constante para evitar el astillamiento por torque reactivo estático.

7.1 SINCRONIZACIÓN DEL VECTOR DE AVANCE LINEAL (V_F) EN CONTROL NUMÉRICO

COMPUTARIZADO (CNC): la velocidad de avance lineal del carro portaherramientas responde estrictamente a la relación constitutiva $v_f = f_n \cdot n$, donde v_f corresponde a los milímetros por minuto (mm/min) y f_n representa el avance por revolución normado (mm/rev). es mandatorio utilizar funciones de avance por revolución activa (g95 en tornos y fresadoras). el avance por tiempo inverso o sin sincronización directa provocará la falla catastrófica instantánea de las aristas cortantes del inserto por sobrecarga asimétrica de material.

8. TRIBOLOGÍA DE LA INTERFAZ, ESPECIFICACIÓN DE FLUIDOS Y EXTREMA PRESIÓN

El brochado rotativo de cavidades ciegas constituye un sistema termodinámico cerrado de alta severidad que genera zonas de confinamiento térmico extremo, donde las presiones localizadas en los vértices del perfil superan los **1 500 MPa**. Esta severidad produce un desgaste acelerado por adhesión molecular y la formación destructiva de Filo de Aportación (*Built-Up Edge - BUE*).

Presión Hidráulica en Sistemas CNC: En centros de maquinado automatizados, el refrigerante soluble (emulsión al 10.0% de concentración micrométrica mínima) debe ser inyectado a través del centro del husillo con una presión hidrostática constante de frontera **mayor a 2.0 MPa**. La dirección del vector de flujo debe orientarse de forma estrictamente colineal al barreno previo para forzar la flotabilidad, garantizar el enfriamiento continuo de la arista y asegurar la expulsión constante de las microvirutas compactadas hacia el exterior de la zona de corte.



9. PROTOCOLO DE ALINEACIÓN METROLÓGICA Y LÍMITES CRÍTICOS DE DESCENTRAMIENTO (RUNOUT)

Una desviación concéntrica (error de excentricidad radial) entre el eje del dispositivo modular HEIN SynchroBroach y el eje de simetría angular de la máquina-herramienta genera una distribución de carga asimétrica cíclica perjudicial. Esta inestabilidad geométrica se traduce en perfiles cónicos desfasados (geometrías en forma de campana) y en la fractura prematura por fatiga de los baleros y rodamientos axiales internos del cabezal basculante.

Para neutralizar este fenómeno y garantizar el estatus de un sistema libre de errores geométricos, el operador de procesos debe aplicar estrictamente en piso el siguiente protocolo de calibración metrológica sistemática:

1. Instale el dispositivo modular portaherramientas en la torreta, bloque portaherramientas o cono de husillo correspondiente de forma totalmente rígida y solidaria.
2. Posicione un indicador de carátula con resolución micrométrica de alta sensibilidad (**0.002 mm**) apoyado firmemente sobre el diámetro exterior rectificado del cabezal porta-brochas oscilante central.
3. Gire manualmente el husillo principal, mandril o plato de sujeción de la máquina 360 grados exactos y registre la Variación Total del Indicador (TIR).
4. El error máximo admisible de excentricidad radial (Runout) acumulado debe mantenerse de forma obligatoria por debajo del estricto límite de control metrológico: **TIR < 0.020 mm**.
5. Si el valor medido supera la frontera crítica de los 0.020 mm, proceda mecánicamente a realinear el bloque portador de la torreta de la máquina o implemente bridas o adaptadores de compensación radial con ajuste concéntrico indexado entre la rosca de 1-1/2" y la interfaz del husillo, hasta llevar el indicador a cero mecánico. Queda estrictamente prohibido alterar la carcasa exterior libre de ajuste de fábrica.

10. MATRIZ DE DIAGNÓSTICO VISUAL DE MODOS DE FALLA Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

La siguiente guía técnica ampliada permite al operador de taller e ingeniero de procesos diagnosticar en tiempo real el origen físico de las desviaciones en la geometría de embutido y aplicar la acción correctiva de ingeniería correspondiente antes de alcanzar el colapso estructural definitivo:

Desgaste Visual	Mecanismo y Causa Raíz	Acción Correctiva de Ingeniería	Régimen
Astillamiento de aristas frontales (Chipping)	Sincronización tardía por falta de guía física o velocidad de avance lineal inicial excesiva en el punto de contacto.	Incrementar el diámetro del chaflán de entrada ($D_c > D_{cc}$). Reducir el avance un 20.0% en los primeros	Cian (Estabilidad)

Desgaste Visual	Mecanismo y Causa Raíz	Acción Correctiva de Ingeniería	Régimen
		0.50 mm de penetración.	
Perfil poligonal helicoidal o espiralado	Resistencia excesiva a la rotación libre en el cabezal interno por adherencia de microvirutas o degradación del lubricante.	Verificar el torque libre manual del sistema de rodamientos. Incrementar de forma inmediata la concentración de aditivos EP en el fluido.	Amarillo (General)
Rotura total del cuerpo de la brocha	Colisión mecánica contra el fondo del barreno previo debido al atascamiento y compresión elástica de la viruta.	Incrementar la profundidad de la cámara de sacrificio ($L_c \geq 0.35 \cdot L_e$). Verificar el desgaste de flanco previo del filo.	Rojo (Peligro)
Geometría en forma de campana (Cónica)	Desalineación axial severa o acumulación de excentricidad acumulada en la máquina-herramienta.	Ejecutar el Protocolo de Alineación Concéntrica (Sección 9). Restringir la excentricidad a TIR < 0.020 mm.	Rojo (Peligro)

11. REQUERIMIENTOS DE POTENCIA NETA Y LÍMITES DE RIGIDEZ ESTRUCTURAL

Para prevenir la activación destructiva de alarmas por sobrecorriente en los servomotores de avance lineal y evitar la deformación permanente de las guías prismáticas de la máquina-herramienta, se debe validar de manera analítica la capacidad de empuje axial disponible en el husillo portador.

11.1 Estimación de Fuerza Axial Mínima (F_a)

La resistencia elástica del material base al desplazamiento plástico confinado determina la carga axial de penetración lineal (F_a). La fuerza se calcula formalmente mediante la siguiente relación lineal de área proyectada bajo los lineamientos de la norma ISO 80000-4:

$$F_a = A_p \cdot R_m \cdot K_c$$

Donde A_p es el área total de la sección del perfil poligonal remanente que será deformada y removida por el vértice activo (mm^2), R_m es la resistencia última a la tracción del material base de la pieza (MPa) y K_c representa el factor adimensional de corrección por fricción lateral de la arista (fijado estrictamente en 1.15 para el diseño geométrico de la línea HEIN).

11.2 Límites Estructurales del Sistema según Interfaz de Husillo

Para garantizar la integridad estructural del acoplamiento roscado de la interfaz posterior modular macho de 1-1/2" x 18 UNF-2A, y evitar la deformación plástica del rodamiento de agujas oscilante interno, se establecen los límites críticos de fuerza axial elástica en Newtons (N). El operador o programador CNC debe calcular previamente la fuerza requerida mediante el modelo de la Sección 11.1 ($F_a = A_p \cdot R_m \cdot K_c$) y validar que la interfaz de la máquina soporte la carga sin exceder los siguientes umbrales:

- **Husillos Cono 30 (BT30 / CAT30 / Cono Morse MT2 y MT3):** Limitados estrictamente a una fuerza axial de empuje máxima de **$F_{\text{axial, max}} = 8\,500\text{ N}$** . Aplicable exclusivamente para perfiles con diámetro circunscrito (D_{cc}) menor a 10.00 mm en materiales ferrosos blandos o aleaciones no ferrosas. Exceder esta frontera provocará la flexión del husillo y un error geométrico severo en la concentricidad.
- **Husillos Cono 40 (BT40 / CAT40 / VDI40 / Cono Morse MT4 / Cono R8):** Capacidad nominal estandarizada de empuje de hasta **$F_{\text{axial, max}} = 25\,000\text{ N}$** . Permite la operación continua de la línea completa de brochas HEIN® HexaForce M2 hasta 20.00 mm de diámetro circunscrito en aceros bonificados. Este es el régimen crítico validado en el diagrama de carga combinada (Figura 5.1).
- **Husillos Cono 50 (BT50 / HSK100 / Cono Morse MT5 / Tornillos de Banco Robustos):** Rango libre de operación con un límite de seguridad mecánica estructural de **$F_{\text{axial, max}} = 45\,000\text{ N}$** . Diseñado para procesos de alta producción, brochado de estrías involutas complejas y materiales aeroespaciales de alta dureza (ISO S) sin restricciones de rigidez en toda la gama de herramienta HEIN®.

12. CARACTERIZACIÓN DE DESGASTE DE LA ARISTA Y MANEJO DE RESIDUOS

12.1 Criterios de Desecho y Control de Vida Útil de la Brocha

Para asegurar la conformidad dimensional de las caras poligonales e indexaciones según los requerimientos metrológicos establecidos, las herramientas HEIN HexaForce M2 deben someterse a una inspección óptica microscópica programada en el laboratorio. Se establece un límite crítico de desgaste de flanco de **$V_B = 0.15\text{ mm}$** medido directamente en la zona del vértice primario de corte. Un desgaste de flanco superior a este límite incrementa de forma exponencial el vector de fuerza radial (F_r), induciendo fallas por deformación plástica del filo, sobre elevación térmica inter-caras y perfiles cónicos desfasados de la tolerancia nominal.

12.2 Disposición de Residuos Metalúrgicos y Cumplimiento Ambiental

La viruta resultante del proceso de brochado rotativo se caracteriza por una elevada densidad geométrica debido a la compactación axial confinada. Al encontrarse impregnadas con aceites directos y aditivos de Extrema Presión (compuestos azufrados y clorados de alta cadena), las virutas extraídas pertenecen estrictamente a la categoría de residuos peligrosos (bajo conformidad con la



norma **NOM-052-SEMARNAT** o regulaciones internacionales de la EPA). Queda prohibida su mezcla con chatarra común de maquinado en seco; deben ser confinadas en contenedores herméticos de polietileno de alta densidad para su recolección y tratamiento por parte de un proveedor de servicios ecológicos autorizado.

13. PROTOCOLOS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL ANTE FLUIDOS DE ALTA PRESIÓN

El uso de sistemas de refrigeración por el centro del husillo a presiones hidrostáticas mayores a **2.0 MPa** introduce riesgos mecánicos y biológicos severos en el piso de producción que deben ser mitigados por el director de operaciones.

Riesgo de Inyección Subcutánea: Queda estrictamente prohibido realizar ajustes mecánicos, inspección visual directa o la apertura de las guardas de la máquina mientras el sistema de bombeo de refrigerante se encuentre presurizado. Un chorro localizado a 2.0 MPa posee energía cinética suficiente para penetrar el tejido epitelial humano, provocando necrosis celular inmediata por toxicidad severa de hidrocarburos.

Neblinas de Maquinado y Contención Térmica: La fricción extrema del proceso eleva la temperatura local de la interfaz por encima del punto de inflamación del fluido portador. Es obligatorio el uso de extractores de neblina con filtración HEPA integrados en la cabina hermética del CNC para evitar la inhalación de aerosoles con azufre activo, reduciendo el riesgo de dermatitis ocupacional y neumonitis química.

14. EXCLUSIÓN DE RESPONSABILIDAD Y TÉRMINOS LEGALES DE OPERACIÓN

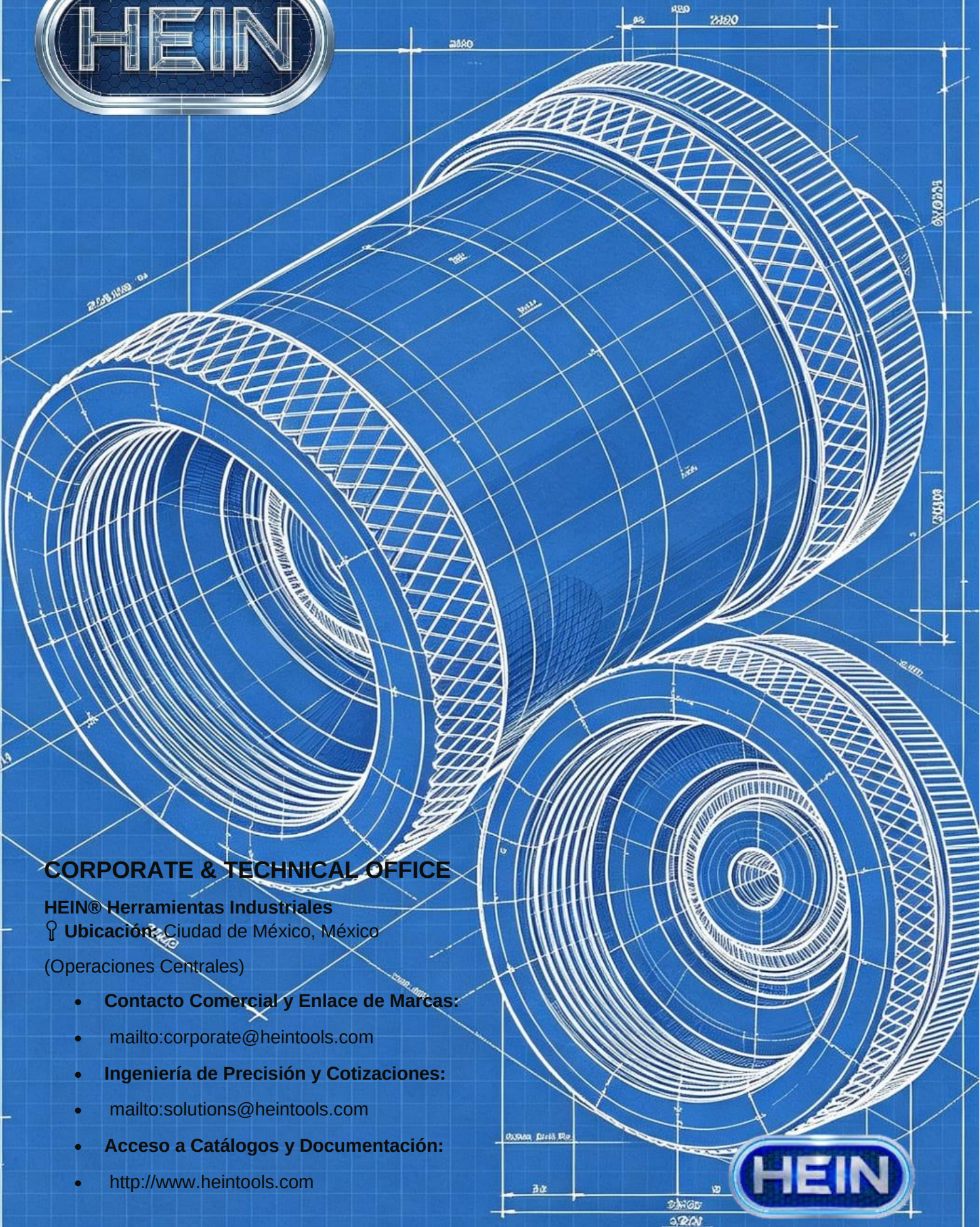
basados en ensayos bajo condiciones controladas de laboratorio y normativas internacionales (ISO / ANSI). Debido a que el rendimiento real de un cabezal de brochado rotativo por oscilación y sus componentes consumibles de corte está sujeto a variables fuera del control de nuestra organización —tales como, pero no limitado a: el estado termomecánico, el juego radial y la rigidez estructural de la maquinaria del usuario, las variaciones en la composición química de los lotes de materia prima, la coaxialidad exacta del barrenado previo, la estabilidad y presión de los fluidos de corte, la pericia del operador y la configuración precisa de los dispositivos de sujeción de la pieza—, HEIN Herramientas Industriales no asume ninguna responsabilidad legal, explícita o implícita, por daños directos, indirectos, incidentales, punitivos o consecuentes resultantes de la aplicación de los parámetros descritos en este documento.

Este documento no constituye una garantía comercial de rendimiento ni un contrato de obligatoriedad técnica para aplicaciones específicas. Es responsabilidad absoluta del usuario final calificar, validar e implementar los protocolos de seguridad industrial vigentes, así como realizar pruebas preliminares en piso de remoción de material para determinar la viabilidad elástica y mecánica de su proceso productivo. HEIN Herramientas Industriales se reserva el derecho de modificar, actualizar o suprimir el contenido técnico de este manual en cualquier momento y sin previo aviso, en concordancia con los avances de nuestra investigación científica y el desarrollo de nuevas tecnologías de manufactura.

Propiedad Intelectual de HEIN Herramientas Industriales: El contenido de ingeniería, ecuaciones de carga combinada, análisis dinámicos de esfuerzo normal, esquemas de geometría previa y tablas de rangos de nuestra aleación propietaria avanzada de grado



estructural detallados representan secreto industrial exclusivo. Queda estrictamente prohibida su distribución, copia, transferencia o reproducción total o parcial a terceros ajenos a la relación comercial sin el consentimiento previo por escrito emitido por el comité corporativo de la empresa.



HEIN® Herramientas Industriales

(Operaciones Centrales)

- **Contacto Comercial y Enlace de Marcas:**
mailto:corporate@heintools.com
- **Ingeniería de Precisión y Cotizaciones:**
mailto:solutions@heintools.com
- **Acceso a Catálogos y Documentación:**
<http://www.heintools.com>

