



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**EFFECTOS DEL AUMENTO DEL PESO DEL EJE FRONTAL DE BUSES
INTERURBANOS EN PUENTES SIMPLEMENTE APOYADOS**

POR

Agustín Villanueva Suárez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Víctor Hugo Aguilar Vidal

Profesional Supervisor
Tomas Benjamín Echaveguren Navarro

Marzo 2025
Concepción, Chile

© 2025 Agustín Villanueva Suárez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

RESUMEN

El transporte terrestre de personas vía buses interurbanos es de gran relevancia para la conectividad nacional. Debido a medidas de seguridad adicionales que se les están exigiendo a las empresas de transporte, principalmente en la cabina de los buses el peso del eje frontal de los buses interurbanos podría aumentar 350 kilogramos. Esta memoria tiene por objetivo evaluar efectos estructurales de este potencial aumento del peso del eje frontal de buses interurbanos en puentes, para aportar con información relevante a los organismos tomadores de decisión.

Utilizando datos de la estación de pesaje Curacaví se determinaron los efectos estructurales: (1) momentos flectores; (2) fuerzas cortantes; y, (3) deterioro por fatiga, generados por buses interurbanos de eje frontal simple en puentes simplemente apoyados menores y medianos. Se compararon las demandas de momento flector y fuerza cortante antes y después del aumento de peso. Además, se compararon las demandas considerando el peso adicional con los patrones de cargas utilizados en el diseño. Finalmente se realizó un análisis de deterioro y disminución de la vida útil de un puente tipo producto del aumento de peso.

En los tres aspectos evaluados se obtuvieron mínimas variaciones respecto del caso base. Los aumentos porcentuales de la demanda a momento y corte respecto del original fueron en promedio del 2% en los casos más desfavorables. Se determinó que la gran mayoría de buses interurbanos, con excepción de algunos pocos *outliers*, siguen estando dentro de la demanda de diseño esperada por ambos patrones de carga. Finalmente, el análisis de deterioro entregó que la vida útil del puente tipo evaluado se redujo aproximadamente de un 0,97%, lo que se traduce en alrededor de 9 meses menos de vida útil respecto de los 75 años que se proyectan.

ABSTRACT

The terrestrial transport of people via interurban buses is of great importance for national connectivity. Due to additional safety measures being required for transport companies, particularly in the bus cabin, the front axle weight of interurban buses could increase by 350 kilograms. The objective of this report is to evaluate the structural effects of this potential increase in front axle weight on bridges, providing relevant information to decision-making authorities.

Using data from the Curacaví weighing station, the structural effects were determined in terms of: (1) bending moments; (2) shear forces; and (3) fatigue deterioration, generated by interurban buses with a single front axle on simply supported small and medium-sized bridges. The bending moment and shear force demands were compared before and after the weight increase. Additionally, the demands considering the additional weight were compared with the load patterns used in design. Finally, an analysis was carried out on the deterioration and reduction in service life of a typical bridge as a result of the weight increase.

In all three evaluated aspects, minimal variations were observed compared to the baseline case. The percentage increases in moment and shear demand, relative to the original values, averaged 2% in the most unfavorable cases. It was determined that the vast majority of interurban buses, with the exception of a few outliers, remain within the expected design demand for both load patterns. Finally, the deterioration analysis indicated that the service life of the evaluated bridge was reduced by approximately 0.97%, which translates to about 9 months less than the projected 75-year lifespan.

DEDICATORIA

A mis padres, Gilda y Juan Pablo por todo el amor, enseñanzas y valores que me han dado a lo largo de los años y que me permiten estar hoy aquí

A mi hermano Pablo, por ser mi alegría desde incluso antes de nacer

A todos los amigos y amigas que hice estos años

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Víctor Aguilar por sus consejos, buena disposición y paciencia al compartir sus conocimientos durante el desarrollo de esta memoria, su guía fue fundamental para este trabajo.

Extiendo también mis agradecimientos al Departamento de Pesaje de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile por proporcionar los datos necesarios para realizar esta investigación.

Finalmente, agradezco el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) mediante el proyecto Fondecyt de Iniciación No. 11230092.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
CAPÍTULO 1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos.....	3
1.4 Alcances	3
1.5 Metodología de trabajo.....	3
1.6 Organización del documento.....	4
CAPÍTULO 2 EFECTOS DE CARGAS VIVAS EN PUENTES	5
2.1 Introducción	5
2.2 Fundamentos teóricos y normativos de las cargas vivas	5
2.2.1 Efectos de cargas vivas.....	5
2.2.2 Patrones de cargas	6
2.2.3 Funcionamiento estaciones de pesaje.....	7
2.2.4 Límites de peso.....	8
2.3 Investigaciones sobre los efectos de cargas vivas	9
2.4 Conclusiones	12
CAPÍTULO 3 EFECTOS A FLEXIÓN, CORTE Y FATIGA PRODUCTO DEL TRÁFICO DE BUSES	13
3.1 Introducción	13
3.2 Base de datos disponible	13
3.3 Estructura de los datos.....	13
3.3.1 Control de calidad aplicado a los datos	14
3.4 Cálculo de las demandas a flexión y corte	15
3.4.1 Espaciamiento entre ejes	15
3.4.2 Comparación de las demandas	16
3.5 Comparación con patrones de carga de diseño	16

3.5.1	Cargas de impacto	16
3.5.2	Expresión de resultados de la comparación	17
3.6	Cuantificación del deterioro por fatiga.....	17
3.6.1	Daño por buses interurbanos	18
3.6.2	Daño esperado según diseño	18
3.6.3	Comparación de daños	19
3.6.4	Daño considerando aumento del tráfico.....	19
3.7	Softwares utilizados	20
3.8	Conclusiones	20
CAPÍTULO 4 EFECTOS DEL TRÁNSITO DE BUSES INTERURBANOS EN PUENTES		21
4.1	Introducción	21
4.2	Buses totales del registro.....	21
4.3	Aumentos en la demanda	21
4.4	Comparación con patrones de carga.....	26
4.4.1	Demanda buses teóricos	27
4.4.2	Comparación mediante percentiles	28
4.4.3	Comparación vano de 10 metros.....	32
4.4.4	Comparación vano de 30 metros.....	35
4.4.5	Comparación vano de 50 metros.....	39
4.4.6	Comparación vano de 70 metros.....	41
4.5	Deterioro adicional por fatiga	43
4.5.1	Momento equivalente.....	43
4.5.2	Momento de diseño según AASHTO 2017.....	43
4.5.3	Tránsito medio diario anual de vehículos pesados.....	43
4.5.4	Índice de acumulación de daño	44
4.5.5	Disminución de la vida útil	45
4.6	Deterioro considerando aumento del tráfico	46

4.6.1	Comparaciones índices de acumulación	47
4.7	Conclusiones	48
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....		49
REFERENCIAS		51
Anexos	53
ANEXO 1.1: Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....		53
ANEXO 4.1: Gráficos distribución normal inversa acumulada		54
ANEXO 4.2: Comparación mediante percentiles.....		154
ANEXO 3.1: Código identificación y control de calidad datos años 2016 al 2019		166
ANEXO 3.2: Código identificación y control de calidad de datos año 2022.....		176
ANEXO 3.3: Código cálculos de momento y corte 2016 al 2019		185
ANEXO 3.4: Código cálculo TMDA pesado 2016 al 2019		188
ANEXO 3.5: Código cálculo TMDA pesado 2022		193

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Estación de pesaje Curacaví.....	8
Figura 2.2	Pesos límite bus de dos ejes	9
Figura 2.3	Pesos límite bus de tres ejes	9
Figura 2.4	CDF de las razones entre momentos para vano de 9 m	10
Figura 3.1	Estructura de datos años 2016 al 2019	14
Figura 3.2	Estructura de datos año 2022	14
Figura 4.1	Comparación de fuerzas cortantes (buses de dos ejes)	22
Figura 4.2	Comparación de momentos flectores (buses de dos ejes)	22
Figura 4.3	Comparación de fuerzas cortantes (buses de tres ejes)	23
Figura 4.4	Comparación de momentos flectores (buses de tres ejes).....	23
Figura 4.5	Aumentos porcentuales de fuerza cortante (dos ejes)	24
Figura 4.6	Aumentos porcentuales de momento flector (dos ejes)	25
Figura 4.7	Aumentos porcentuales de fuerza cortante (tres ejes).....	25
Figura 4.8	Aumentos porcentuales de momento flector (tres ejes)	26
Figura 4.9	Percentiles de la demanda de corte en buses de 3 ejes (Cu12-2016).....	28
Figura 4.10	Percentiles de la demanda de momento en buses de 3 ejes (Cu12-2016).....	29
Figura 4.11	Percentiles de la demanda de corte en buses de 3 ejes (Cu34-2018).....	29
Figura 4.12	Percentiles de la demanda de momento en buses de 3 ejes (Cu34-2018).....	30
Figura 4.13	Percentiles de la demanda de corte en buses de 3 ejes (Cu12-2022).....	30
Figura 4.14	Percentiles de la demanda de momento en buses de 3 ejes (Cu12-2022).....	31
Figura 4.15	Vano de 10 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2016)	32
Figura 4.16	Vano de 10 metros, momento buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2016)	33
Figura 4.17	Vano de 10 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2016).....	34
Figura 4.18	Vano de 10 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2016).....	34
Figura 4.19	Vano de 30 metros, corte buses de 2 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)	35
Figura 4.20	Vano de 30 metros, momento buses de 2 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)	35
Figura 4.21	Vano de 30 metros, corte buses de 2 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018).....	36
Figura 4.22	Vano de 30 metros, momento buses de 2 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018).....	36
Figura 4.23	Vano de 30 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)	37
Figura 4.24	Vano de 30 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)	37
Figura 4.25	Vano de 30 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018).....	38
Figura 4.26	Vano de 30 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018).....	38
Figura 4.27	Vano de 50 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)	39

Figura 4.28	Vano de 50 metros, momento buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)	39
Figura 4.29	Vano de 50 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017).....	40
Figura 4.30	Vano de 50 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017).....	40
Figura 4.31	Vano de 70 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)	41
Figura 4.32	Vano de 70 metros, momento buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)	41
Figura 4.33	Vano de 70 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017).....	42
Figura 4.34	Vano de 70 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017).....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Casos de carga HS20-44.....	6
Tabla 2.2 Casos de carga HL-93	7
Tabla 4.1 Demanda HS20-44+20%.....	27
Tabla 4.2 Demanda HL-93	27
Tabla 4.3 Demandas permitidas actuales	27
Tabla 4.4 Demandas permitidas con peso adicional.....	27
Tabla 4.5 Momentos equivalentes	43
Tabla 4.6 TMDA pesado obtenido del registro	44
Tabla 4.7 Daños calculados	44
Tabla 4.8 Índices de acumulación de daño.....	45
Tabla 4.9 Tráfico pesado ruta 68	46
Tabla 4.10 Daño esperado en 5 años	47
Tabla 4.11 Índices de acumulación en 5 años	47

CAPÍTULO 1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

Los puentes son parte fundamental de la red caminera nacional, por lo que su buen estado y funcionamiento son cruciales para la conectividad y crecimiento del país. Considerando esto, se tiene que un puente se verá sometido a distintos tipos de carga a lo largo de su vida útil, destacando entre ellas las cargas vivas, esto debido a la incertidumbre que rodea su magnitud y frecuencia reales a comparación de las esperadas en el diseño.

De entre los vehículos que circulan sobre los puentes, los que generan mayores efectos y potencialmente daños son los vehículos con un peso bruto superior a 9 toneladas (Babu, 2019), adicionalmente se tiene que, una fracción importante de estos vehículos está compuesta por los distintos tipos de buses interurbanos que circulan por el país.

Los buses interurbanos son fundamentales en el sistema de transporte de pasajeros a nivel regional y nacional, trasladando a más de 70 millones de pasajeros anualmente de acuerdo con la fiscalización del transporte interurbano realizada por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT, 2019), también se tiene que, una fracción considerable de los buses interurbanos está compuesta por buses de eje simple frontal, correspondiendo estos a buses de dos y tres ejes.

Actualmente el peso del eje frontal de los buses interurbanos podría aumentar 350 kilogramos, esto debido a medidas de seguridad adicionales en la cabina que se les están exigiendo a las empresas de buses, tales como la inclusión de barras antivuelco en la parte frontal, aumento de espesor de los vidrios parabrisas y sistemas de seguridad adicionales en los cinturones de los asientos de la parte frontal de los buses.

En Chile los puentes se diseñan según lo dispuesto por el Ministerio de Obras Públicas en el Manual de Carreteras volumen 3 (MOP, 2023) que establece que la carga viva se represente según el patrón de cargas HS20-44+20%, que a su vez está basado en el antiguo patrón de cargas norteamericano HS20-44, establecido en la AASHTO Standard (AASHTO, 2002). Sin embargo, actualmente este patrón es obsoleto en la normativa estadounidense y en cambio se utiliza el patrón HL-93 establecido en la AASHTO LRFD (2012) y posteriores.

Varios estudios se han realizado en el extranjero, principalmente en los Estados Unidos y Europa sobre las características reales de la carga viva que circula sobre los puentes y los efectos que generan sobre estos en contraste con los esperados con los patrones de carga utilizados para el diseño. Dichos estudios se enfocan en medir el peso del tráfico real mediante la tecnología *weight-in-motion* (en adelante WIM) y comparar las demandas a momentos flectores, fuerzas cortantes y fatiga que producen con las demandas esperadas de acuerdo a los patrones de carga correspondientes. Para el caso chileno hay aún una ausencia de estudios que comparen las cargas reales con el patrón de cargas establecido en el Manual de Carreteras y con patrones más actualizados en el ámbito internacional, como el HL-93, dichos estudios pueden realizarse apoyándose en los datos ya existentes de vehículos reales que se recolectan diariamente en las estaciones de pesaje distribuidas a lo largo del territorio nacional.

Los pesos brutos máximos y pesos máximos por eje de los buses interurbanos se encuentran regulados por el decreto supremo N°158 de 1980, que establece los pesos máximos de los vehículos que circulan por caminos públicos, siendo el límite normativo para un eje simple de 7 toneladas, dicho límite podría verse superado debido al peso adicional del eje frontal mencionado en la motivación, por lo que se busca determinar los efectos del potencial aumento de peso sobre los puentes que forman parte de la red caminera nacional, esto a fin de respaldar un aumento del límite normativo actual.

Esta memoria se enmarca en el proyecto FONDECYT de iniciación No.11230092, busca evaluar los efectos a momentos flectores, fuerzas cortantes y deterioro generados por buses interurbanos sobre los puentes con vanos de longitudes dentro de las categorías menores y medianos de acuerdo con las categorías establecidas por el Manual de Carreteras, además de los efectos comparativos que podría tener un eventual aumento del peso máximo normativo establecido por el Departamento de Pesaje.

1.2 Objetivo general

Determinar los efectos del aumento del peso del eje frontal de buses interurbanos en puentes simplemente apoyados clasificados como menores o medianos según la longitud de su vano.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar los aumentos de la demanda de flexión y corte producto del peso adicional, mediante análisis estructural de cargas móviles sobre vigas simplemente apoyadas.
- Comparar los efectos del aumento de peso del eje frontal de buses interurbanos con las demandas de diseño del Manual de Carreteras Vol. 3 y AASHTO LRFD *Bridge Design Specification*.
- Determinar el deterioro adicional en puentes producto del potencial aumento de peso del eje frontal.

1.4 Alcances

El análisis se enfocará en puentes simplemente apoyados considerando una vía cargada, los vanos a evaluar se definieron entre 10 y 70 metros, esto basado la clasificación de puente menor y mediano según el Manual de Carreteras volumen 3, según longitud de vano. Se trabajará con los datos de la estación de pesaje Curacaví en la Región Metropolitana recolectados entre los años 2016 al 2019 y el 2022.

1.5 Metodología de trabajo

Se estudian los registros de los años 2016 al 2019, además del 2022 en la estación de pesaje de Curacaví, se filtran mediante programación en Python los datos a través del código vehicular establecido por el MOP para extraer los buses interurbanos de eje simple frontal, luego se realiza un control de calidad a los datos para eliminar registros según distintos parámetros, generándose archivos de texto con las bases de datos filtradas por año y dirección del tránsito.

Posteriormente, con la base de datos filtrada se calculan los momentos flectores y fuerzas cortantes máximas generadas por cada uno de los registros, esto realizando un análisis de cargas móviles programado en Python, análogamente se realiza el mismo proceso para los registros considerando los 350 kilogramos adicionales en el eje frontal, considerándose para ambos casos cuatro vanos de

estudio, finalmente, se comparan los resultados obtenidos con los esperados según los patrones de carga HS20-44+20% y HL-93 respectivamente.

Por último, se realiza un análisis de deterioro utilizando la metodología propuesta por Babu (2019), basada en los momentos flectores y números de ciclos de carga aplicados a los puentes, para lo que se define un puente tipo, mediante el cual se compara el deterioro por año generado por los buses después del aumento de peso con el deterioro esperado según el camión de fatiga establecido en la AASHTO 2017 y el número de pasadas de camión durante toda la vida útil.

1.6 Organización del documento

El documento se conforma por cinco capítulos. El Capítulo 1 presenta la motivación y problema a resolver de la memoria, además de los objetivos y sus correspondientes metodologías, en el Capítulo 2 se realiza una revisión del estado del arte sobre las investigaciones a momentos flectores, fuerzas cortantes y deterioro producido por cargas vivas sobre puentes a comparación de las esperadas en el diseño. En el Capítulo 3 se detallan los datos disponibles, además de los procesos de control de calidad aplicados sobre estos, igualmente, se presentan las herramientas y métodos utilizados para calcular los efectos de la carga viva utilizando dicha base de datos. En el Capítulo 4 se enseñan los resultados obtenidos a partir de los procedimientos detallados en la metodología, incluyéndose gráficos y tablas con los mismos para facilitar su interpretación. Finalmente, en el Capítulo 5 se determina si los efectos adicionales producto de aumentar el peso del eje frontal son considerables y si es viable proponer un aumento del límite normativo.

CAPÍTULO 2 EFECTOS DE CARGAS VIVAS EN PUENTES

2.1 Introducción

En el presente capítulo se explican brevemente los principales efectos generados sobre los puentes producto del tránsito de cargas vivas, además de realizar una revisión sobre estudios relevantes enfocados en cada uno dichos efectos producto del tráfico real y su comparación con lo esperado en el diseño.

2.2 Fundamentos teóricos y normativos de las cargas vivas

Se detallan los conceptos fundamentales para entender y resolver el problema de estudio, contemplando una breve explicación de los efectos en puentes producto de cargas vivas y diversos aspectos normativos relacionados.

2.2.1 Efectos de cargas vivas

El diseño de puentes a cargas vivas se enfoca en tres principales aspectos: efectos a momentos flectores, fuerzas cortantes y deterioro o daño por fatiga. Los dos primeros dependientes de factores como el peso de cada eje del vehículo, espaciamiento de los ejes del vehículo, posición del vehículo en el puente y longitud del vano, entre otros (Nowak, 1993). Los efectos de fatiga se refieren al deterioro en el tiempo a la estructura producto de la aplicación cíclica de cargas externas (Ye *et al.*, 2014). Dichas cargas pueden ser inferiores a la resistencia máxima de la estructura pero generan daño acumulativo debido a su aplicación repetitiva. Los daños de fatiga no dependen solo del peso o espaciamiento de los ejes del vehículo, sino que la frecuencia de tránsito de los vehículos sobre el puente también juega un rol importante.

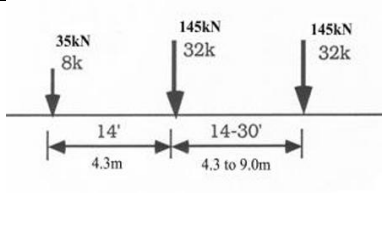
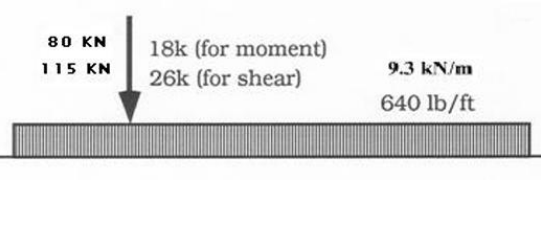
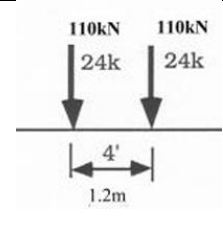
2.2.2 Patrones de cargas

El diseño de puentes a cargas vivas se realiza utilizando patrones de cargas, que son vehículos y/o combinaciones de vehículos teóricos cuyos pesos y espaciamientos entre ejes buscan englobar las cargas producto del tráfico real esperado en el puente durante la vida útil del mismo, puesto que el objetivo de los patrones de cargas es representar fidedignamente el tráfico real, es normal que dichos patrones se modifiquen según la época o la ubicación geográfica, pues el tráfico también cambiará producto de esas variables.

En Chile actualmente los puentes se diseñan utilizando el patrón de cargas HS20-44+20% establecido en el Manual de Carreteras Vol.3 (MOP, 2023), que a su vez está basado en el antiguo patrón de cargas estadounidense HS20-44 establecido en la AASHTO STD (AASHTO, 2002), cabe decir que, dicho patrón de cargas actualmente está en desuso en los Estados Unidos y ha sido reemplazado por el HL-93 establecido en la AASHTO LRFD (AASHTO, 2012), que es un patrón de cargas mucho más exigente que el HS20-44 anterior, lo que denota como el tráfico ha ido evolucionando con el tiempo. Marchini (2024) estudia la evolución de características relevantes de la carga viva a lo largo del tiempo en base a información de pesaje en movimiento de la plaza de pesaje de Curacaví.

El patrón HS20-44 de la AASHTO (2002) se compone de tres casos de cargas, el primero es el camión HS20, que es un camión de tres ejes de 325 kN de peso bruto, el segundo es una carga de faja de 9,3 kN/m que representa el tránsito de vehículos más pequeños más una carga puntual, y el tercero es un camión tándem militar de dos ejes de 220 kN de peso bruto. El patrón modificado HS20-44+20% amplifica en un 20% las cargas del camión HS20-44 original, los tres casos de cargas contemplados en el HS20-44 se ilustran a continuación:

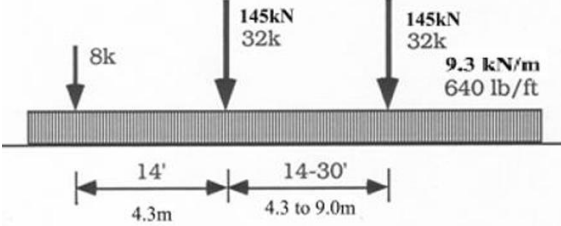
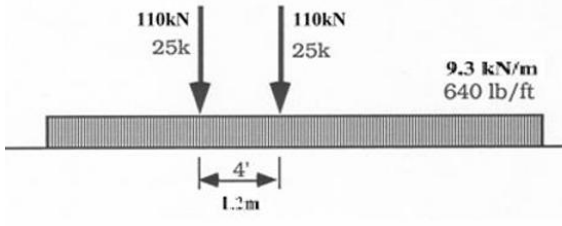
Tabla 2.1 Casos de carga HS20-44

Camión HS20	Carga de faja y carga puntual	Camión tándem
		

Fuente: AASHTO STD (2002)

El patrón de cargas vigente en la normativa norteamericana es el HL-93, que contempla dos casos de cargas resultantes de combinar los dos camiones del HS20-44 con la carga de faja, obteniéndose mayores demandas, lo que se ilustra en la siguiente Tabla:

Tabla 2.2 Casos de carga HL-93

Camión HS20 y carga de faja	Camión tándem y carga de faja
	

Fuente: AASHTO LRFD (2012)

Por último, la AASHTO (2017) considera un patrón de cargas específico para el diseño a fatiga, que consiste en la misma configuración de peso y espaciamiento del camión HS20, pero con un 80% de su peso bruto y un espaciamiento constante de 30 pies entre los ejes traseros (Babu, 2019).

2.2.3 Funcionamiento estaciones de pesaje

En Chile las estaciones de pesaje consisten en dos tipos de balanzas para controlar el peso vehicular:

- Selectiva: balanza obligatoria para todos los vehículos pesados, funciona mediante la tecnología WIM que permite que el vehículo se pese en movimiento, tiene una precisión limitada por lo que los vehículos que detecta con sobrepeso deben pasar a la segunda balanza a fin de determinar un peso más exacto.
- Punitiva: balanza a la que pasan los vehículos con un probable sobrepeso, los vehículos deben circular sobre ella a velocidades de máximo 6 km/h (Ortiz, 2024), el exceder el peso máximo en esta balanza conlleva una multa y actualmente no existe un control para garantizar que los vehículos efectivamente se pesen en esta balanza, por lo que el hacerlo queda a criterio del conductor finalmente, misma razón por la que esta balanza tiene considerablemente menos registros que la selectiva.

Dado que la balanza selectiva tiene la mayor cantidad de registros vehiculares, en este estudio se trabajará únicamente con los datos de dicha balanza.

A continuación, se presenta una imagen satelital obtenida mediante Google Maps de la estación de pesaje Curacaví, ubicada en la ruta 68:



Figura 2.1 Estación de pesaje Curacaví
Fuente: Google Maps

Donde se observa que las estaciones de pesaje se ubican a ambos lados de la carretera, esto con el objetivo de controlar a los vehículos que circulan en ambas direcciones, definiéndose en la base de datos la dirección 12 como la que se aleja de Santiago, mientras que la dirección 34 es la que se acerca a Santiago (Ortiz, 2024).

2.2.4 Límites de peso

El departamento de pesaje establece límites máximos de peso por eje y de peso bruto según el tipo de vehículo, para el caso de buses de dos ejes el límite del peso del eje trasero es de 11000 kilos, mientras que la combinación de los ejes traseros del bus de tres ejes puede pesar máximo 16000 kilos, el límite del eje frontal es de 7000 kilos para ambos casos. Cabe mencionar que, en el decreto que establece los límites de peso, la nomenclatura kilo es utilizada para referirse a kilogramos-fuerza.

A continuación, se presentan las Figuras 2.1 y 2.2 con los pesos máximos por eje permitidos por el departamento de pesaje para los buses de eje simple frontal:

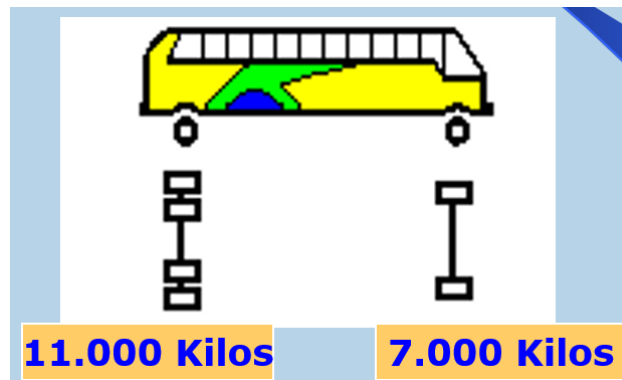


Figura 2.2 Pesos límite bus de dos ejes
Fuente: Departamento de Pesaje

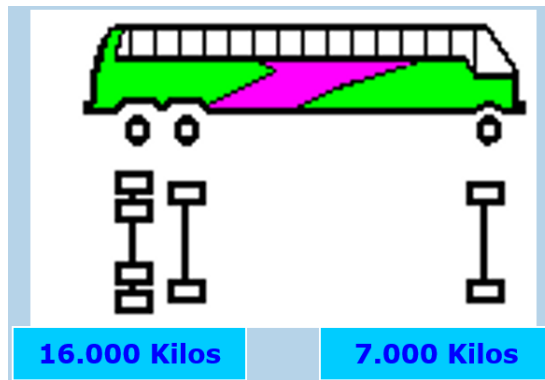


Figura 2.3 Pesos límite bus de tres ejes
Fuente: Departamento de Pesaje

2.3 Investigaciones sobre los efectos de cargas vivas

Los estudios de momentos flectores y fuerzas cortantes se enfocan principalmente en medir las cargas producto del tráfico real mediante la tecnología WIM y comparar los momentos y cortes que generan en puentes de distintos vanos con los esperados según patrones de carga. Destacan en este aspecto el estudio de Nowak *et al.* (1993) que calcularon los efectos generados por más de 600000 camiones pesados con la tecnología WIM en Estados Unidos y luego los compararon con las demandas esperadas en distintos vanos de estudio según el patrón de cargas HS20-44, que era el vigente en ese momento. Análogamente, Babu *et al.* (2019) trabajaron con bases de datos WIM de Estados Unidos y Europa para comparar los efectos de cargas reales con las esperadas en varios vanos según el patrón de cargas HL-93, que es el vigente actualmente para puentes concesionados en el caso chileno.

En ambos estudios se observa que la mayoría de vehículos genera demandas inferiores a las esperadas según diseño, sin embargo, existe un porcentaje de vehículos pesados que generan demandas superiores a las de los patrones de cargas. Por ejemplo, en el estudio de Babu *et al.* (2019) los resultados se expresan utilizando la función de distribución acumulada (CDF por sus siglas en inglés) de las razones entre las demandas generadas por los vehículos medidos en las estaciones WIM y las demandas esperadas según el HL-93, como se observa a continuación:

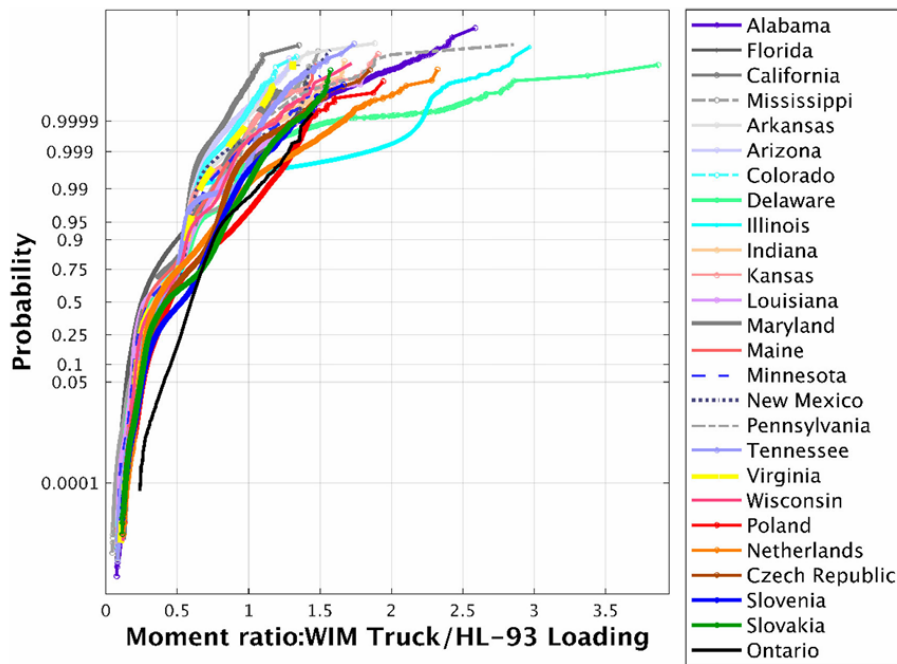


Figura 2.4 CDF de las razones entre momentos para vano de 9 m
Fuente: Babu *et al.* (2019)

De donde se desprende que entre el 0 y el 5% de los vehículos excede la razón de utilización igual a uno, que representa el momento máximo esperado según el HL-93, lo que varía dependiendo del estado o del país donde se haya recabado la información.

Los estudios a fatiga se basan en relacionar los esfuerzos aplicados con un correspondiente número de ciclos de carga hasta la falla del material, lo que se realiza utilizando las curvas S-N y la relación establecida por Basquin (1910), que en el artículo de Ye *et al.* (2014) se expresa como:

$$\log N = -m \log S + \log A \tag{2.1}$$

Donde N es el número de ciclos hasta la falla del elemento bajo un esfuerzo constante S, mientras que m y A son constantes empíricas que dependen del material.

Adicionalmente, considerando que un puente se verá sometido a esfuerzos de varias amplitudes a lo largo de su vida útil, es conveniente transformar los distintos esfuerzos a un esfuerzo constante, lo que se logra utilizando la regla de Palmgren-Miner (Miner, 1945) que mide los daños acumulados al puente por esfuerzos de amplitud variable según la siguiente expresión (Babu, 2019):

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.2)$$

Donde n_i es el número de ciclos de carga aplicados al puente a una determinada amplitud S_i , mientras que N_i es el número de ciclos de carga hasta la falla del elemento a dicha amplitud de esfuerzo, en este método, la falla del elemento ocurre cuando la suma del daño generado por todos los ciclos de carga es igual a la unidad.

Basándose en la regla de Palmgren-Miner se han generado distintos métodos para transformar los esfuerzos aplicados a un único esfuerzo constante, como por ejemplo el implementado por Szerszen *et al.* (1999), en el que se calcula un esfuerzo equivalente con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{eq} = \sqrt[3]{\sum (S_i^3 \cdot p_i)} \quad (2.3)$$

Donde S_i es la media del intervalo de esfuerzos i y p_i es la frecuencia relativa de cuantos ciclos de carga hay en el intervalo i .

Otro método para calcular el daño a los puentes, también basado en la regla de Palmgren-Miner, es el utilizado por Babu (2019) que calcula el daño en función de los momentos flectores y el número de ciclos de carga aplicados al puente, para lo que primero se transforman los diferentes momentos aplicados al puente a un único momento equivalente utilizando la siguiente ecuación:

$$M_{eff} = \left[\sum \frac{n_i}{N} M_i^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (2.4)$$

Donde M_{eff} es el momento equivalente, n_i es el número de ciclos de carga generados por el vehículo que produjo el momento M_i , N es el número de total de ciclos de carga y m es una constante que depende del material.

Una vez calculado el momento equivalente, Babu (2019) calcula el daño generado como sigue:

$$D = NM_{\text{eff}}^m \quad (2.5)$$

Para finalmente comparar el daño generado por los vehículos registrados en el WIM con el daño esperado según el camión de diseño a fatiga de la AASHTO 2017, esto utilizando el índice de acumulación de daño:

$$\alpha = \frac{(NM_{\text{eff}}^m)_{\text{según camiones WIM}}}{T \cdot (NM_{\text{eff}}^m)_{\text{Según camión de diseño}}} \quad (2.6)$$

Donde α es el índice de acumulación de daño y T es el número de camiones esperados durante la vida útil del puente.

2.4 Conclusiones

En este capítulo se presentaron los fundamentos teóricos de los efectos de cargas vivas sobre puentes, además de detallar aspectos normativos relacionados a nivel nacional e internacional, adicionalmente se describió el proceso mediante el cual se levantan los datos del peso real de tráfico en las estaciones de pesaje y finalmente se realizó una breve revisión bibliográfica de las investigaciones actuales más relevantes sobre los efectos de cargas vivas en puentes. La metodología aplicada en dichas investigaciones es útil para realizar estudio similares sobre los efectos de las cargas vivas nacionales sobre los puentes, principalmente en los temas de fuerzas cortantes, momentos flectores y deterioro por fatiga, todo esto aprovechando la información disponible de las estaciones de pesaje.

CAPÍTULO 3 EFECTOS A FLEXIÓN, CORTE Y FATIGA PRODUCTO DEL TRÁFICO DE BUSES

3.1 Introducción

En este capítulo se detallan los procedimientos utilizados para completar cada uno de los tres objetivos específicos propuestos en el Capítulo 1, basando dichos procedimientos en los estudios de cargas vivas realizados en el resto del mundo, además del marco teórico y normativas aplicables en el contexto nacional e internacional.

3.2 Base de datos disponible

Existen numerosas estaciones de pesaje a lo largo del país que recaban diversos datos de cada vehículo que se pesa, como la fecha y hora de la pesada, velocidad del vehículo y peso de cada eje vehicular entre otros, uno de los datos registrados es el código MOP, que es un código específico que el ministerio asigna a cada tipo de vehículo, para el caso de este estudio es relevante el código 210, correspondiente a un bus de dos ejes, y los códigos 320 y 321 correspondiente a buses de tres ejes, siendo estos los buses con eje simple frontal.

Para este estudio se poseen registros diarios de cinco estaciones de pesaje de los años 2016 al 2019, además del 2022. Sin embargo, debido al gran volumen de datos que se obtiene entre las cinco estaciones, se optó por trabajar únicamente con la estación de pesaje de Curacaví en la Región Metropolitana, esto ya que es la estación con la mayor cantidad de registros, teniendo información de más de ocho millones de vehículos a lo largo de los cinco años disponibles, además de la gran cantidad de buses registrados, siendo aproximadamente un 30% del total de vehículos (Marchini, 2024).

3.3 Estructura de los datos

Los datos recolectados en cada pesada a lo largo de los cinco años disponibles son en general los mismos, sin embargo, desde el año 2022 se implementó un cambio en el formato que se almacenan los datos, en las Tablas 3.1 y 3.2 se presentan los dos formatos utilizados y los cambios realizados en el 2022:

Sample	Fecha	Hora	Velocidad	Tipo_DV	Msg	Largo	Estación	P1	P2	...	P12
--------	-------	------	-----------	---------	-----	-------	----------	----	----	-----	-----

Figura 3.1 Estructura de datos años 2016 al 2019

Fuente: Departamento de Pesaje

Sample	Patente	Fecha	Hora	Velocidad	Largo	Tipo_DV	Sc_eje	Sc_pbt	Msg	Estación	P1	P2	...	P9	PBT
--------	---------	-------	------	-----------	-------	---------	--------	--------	-----	----------	----	----	-----	----	-----

Figura 3.2 Estructura de datos año 2022

Fuente: Departamento de Pesaje

Los datos recolectados en ambos formatos son la abreviación del nombre de la estación y dirección del tránsito, por ejemplo para la estación de Curacaví en la dirección 12 se registra como Cu-12, los pesos por eje, además de la fecha y la hora de la pesada, la velocidad en kilómetros por hora del vehículo al pasar por la estación WIM, el largo del vehículo en metros, el tipo vehicular (Tipo_DV) que se refiere al código que le asigna el MOP a cada vehículo, la columna Sample que numera cada pesada tomando valores de 1 a 10000 y finalmente la columna Msg que indica posibles errores durante la medición.

Los principales cambios realizados en el formato del año 2022 corresponden al número de ejes medidos, que pasaron de 12 a 9, además de que las unidades pasaron de toneladas a kilogramos, la inclusión de una columna con el peso bruto del vehículo en el formato 2022, la inclusión de dos columnas con posibles sobrecargas y además de una columna con la patente del vehículo en 2022.

3.3.1 Control de calidad aplicado a los datos

Después de seleccionarse la base de datos a utilizar, lo primero que se hizo fue identificar los buses interurbanos con eje simple frontal según el código vehicular de cada registro, los que son 210 para buses de dos ejes y 320 o 321 para buses de tres ejes.

Cabe mencionar que desde 2016 a 2018 los códigos vehiculares fueron registrados en formato de dos dígitos, por lo que por ejemplo el código 210 pasó a ser 21, mientras que los códigos 320 y 321 pasaron a ser 32, mientras que en el año 2019 hay registros utilizando los códigos con ambos formatos, optándose por utilizar la base de datos con dos dígitos por ser la más completa y para no duplicar vehículos, finalmente en el año 2022 se utilizan los códigos en formato de tres dígitos.

Después de identificar los buses con eje frontal simple se le aplicaron los siguientes controles de calidad a los datos:

- **Peso mínimo:** Se eliminaron del registro buses con pesos brutos menores a 9 toneladas, esto basado en la tesis de Babu (2019), en la que se observa que vehículos livianos con pesos menores a 20 kips (aproximadamente 9 toneladas) tienen un efecto mínimo sobre los puentes y son descartables.
- **Correcto número de ejes:** Se eliminaron del registro los buses que no tenían un número de ejes acorde a su código MOP, por ejemplo, buses 321 que no tuvieran tres ejes.
- **Velocidad máxima:** Se descartaron buses con velocidad superiores a 120 km/h por considerarse que estos valores probablemente son un error en la medición.
- **Días sin datos:** Se descartaron días que tuvieran la hoja del registro en blanco.

3.4 Cálculo de las demandas a flexión y corte

Usando la base de datos filtrada se calculó el momento y corte máximo producido por cada uno de los buses del registro en cuatro vanos de estudio, siendo estos de 10, 30, 50 y 70 metros, seleccionándose las longitudes en función de la clasificación de puentes menores y medianos según vano del Manual de Carreteras volumen 3 (MOP, 2023) y la cantidad de vanos basándose en los artículos de Nowak *et al.* (1993) y Babu *et al.* (2019) quienes para sus estudios de momento y corte usaron un número de vanos similares, luego, se realizó el mismo procedimiento pero considerando un peso adicional de 350 kilogramos en el eje frontal, finalmente mencionar que los cálculos fueron realizados mediante un análisis de cargas móviles programado en Python, en el que se calculan el momento y corte para cada una de las posiciones del vehículo sobre el puente, variándose 10 centímetros la posición cada vez y almacenándose los máximos obtenidos.

3.4.1 Espaciamiento entre ejes

La distancia entre ejes se definió en base a valores típicos medidos en buses interurbanos en el terminal Collao de Concepción, utilizándose un espaciamiento de 6,5 metros para los buses de dos ejes, mientras que para el bus de tres ejes se definió un espaciamiento de 6,9 metros entre el eje frontal y el segundo eje, y de 1,4 metros entre el segundo y tercer eje (Catalán, 2023).

3.4.2 Comparación de las demandas

Se determinó la diferencia entre las demandas para cada uno de los buses del registro, expresándose dicha diferencia en términos netos y también en términos porcentuales respecto del caso actual, calculándose los aumentos promedios y máximos para cada uno de los vanos producto del peso adicional y graficándose las demandas promedio antes y después del aumento de peso, además de los aumentos porcentuales promedios y máximos en función de la longitud de vano para facilitar la interpretación de los resultados.

3.5 Comparación con patrones de carga de diseño

Se comparan las demandas a momento y corte generadas por los buses interurbanos considerando el peso adicional con la esperada según los patrones de carga HS20-44+20% del Manual de Carreteras Volumen 3 (MOP, 2023) y el HL-93 de la AASHTO LRFD (AASHTO, 2012) en los cuatro vanos de estudio propuestos en la metodología del primer objetivo, calculándose las demandas de dichos patrones de cargas mediante programación en Python.

3.5.1 Cargas de impacto

Las cargas vivas tienen un componente estático y dinámico, el componente estático es el estudiado hasta ahora, dependiente de la configuración de peso del vehículo y del vano del puente entre otros factores, mientras que el componente dinámico o de impacto se refiere a los efectos de la interacción entre el vehículo y el puente, siendo esto dependiente de la condición de la superficie de rodado, de la frecuencia de vibración del puente y de la suspensión del vehículo (Nowak, 1993). En los patrones de cargas estudiados el efecto de las cargas de impacto se representa como un factor que amplifica las demandas a corte y momento generadas por la componente estática de la carga viva, para efectos de este trabajo los momentos y cortes obtenidos según los patrones de carga serán calculados sin considerar las cargas de impacto, esto debido a que los buses también tienen una componente dinámica pero el determinar su valor real va más allá del alcance de este estudio, así que se optó por comparar las demandas producto de la componente estática de los buses interurbanos con las demandas producto de la componente estática de los patrones de cargas.

3.5.2 Expresión de resultados de la comparación

La comparación se realizó mediante gráficos de distribución normal inversa en función de la razón de la demanda de cada uno de los buses del registro sobre la demanda de los patrones de carga, esto para los 4 vanos de estudio y separando los buses según número de ejes, incluyéndose también la demanda esperada según el peso máximo permitido con el aumento propuesto. Adicionalmente se calcularán y graficarán los percentiles 5, 25, 50, 95 y máximo de las demandas generadas por los buses y se compararán con las esperadas de los patrones de cargas según la longitud de vano.

3.6 Cuantificación del deterioro por fatiga

Se realizó un análisis de deterioro basado en el trabajo de Babu (2019), que cuantifica el daño en función los momentos flectores y el número de ciclos de carga aplicados al puente, para esto se definió un caso de estudio hipotético con las siguientes características:

- Puente con vano de 30 metros
- Vigas de acero
- Datos de la estación Curacaví
- Análisis enfocado en las vigas
- Cada bus genera un único ciclo de carga

Se optó por usar vigas de acero debido a que puentes de este material son más propensos a sufrir grietas por fatiga en comparación a otros tipos de puente (Babu, 2019), la longitud de vano se estableció en 30 metros pues los puentes con longitud total igual o menor a esta son los más comunes en Chile (Dirección de Vialidad, 2022), finalmente, se decidió definir que cada vehículo genera un único ciclo de carga debido a que calcular el número de ciclos de carga reales generados por cada bus es un proceso complejo que va más allá del alcance de esta memoria.

3.6.1 Daño por buses interurbanos

Se calculan los momentos equivalentes generados por los buses a lo largo de los cinco años de datos disponibles considerando el caso antes y después del aumento de peso, esto utilizando la Ecuación 2.4, en la que cada término de la sumatoria corresponde al paso de un vehículo, por esto y además de la simplificación del número de ciclos de carga es que el término n_i se toma como igual a 1, el término N se toma como el número total de buses en los cinco años del registro, adicionalmente, el término M_i serán los momentos calculados para vanos de 30 metros en la metodología del objetivo 1, y la constante m tomará un valor igual a 3 debido a que las vigas son de acero (Babu, 2019).

Una vez calculados los momentos equivalentes en ambos casos, se calcula el daño generado mediante la Ecuación 2.5, reemplazándose N y m por los valores mencionados anteriormente.

3.6.2 Daño esperado según diseño

El daño esperado según diseño en toda la vida útil del puente, tal como se mencionó en el Capítulo 2, viene dado por el momento flector producido por el camión de fatiga de la AASHTO 2017 en el vano evaluado, el número de ciclos de carga que genera una única pasada de dicho camión sobre el puente y por el número de camiones totales que se esperan que transiten sobre el puente durante su vida útil, lo que dependerá de para cuantos años de vida útil se diseñe el puente, para este caso se considerarán 75 años, y del tránsito medio diario anual de vehículos pesados sobre el puente (en adelante TMDA pesado) que puede tomar valores entre 250 hasta 10000 camiones diarios (Babu *et al.*, 2019).

El momento flector generado por el camión de diseño a fatiga de la AASHTO se determinó mediante el análisis de cargas móviles en Python mencionado en la metodología del objetivo 1, considerando un vano de 30 metros.

El TMDA pesado para el puente hipotético se definió utilizando la base de datos de la estación de Curacaví, mediante un código de Python que calculó el promedio diario considerando únicamente vehículos pesados mayores a 9 toneladas (Babu, 2019) y los días en que la estación trabajó las 24 horas.

Finalmente, hay que mencionar que la simplificación de ciclos de cargas también fue aplicada para el camión de fatiga de la AASHTO, por lo que se consideró que cada pasada del camión sobre el puente genera un único ciclo de carga.

3.6.3 Comparación de daños

Habiéndose calculado ya el daño generado por los buses interurbanos antes y después del aumento de peso, además del daño esperado en el puente durante toda su vida útil, se compararon los daños mediante el índice de acumulación de daño utilizado por Babu (Ecuación 2.6) y luego se calculó la razón de dicho índice sobre la fracción de vida útil del puente que debería consumirse en el periodo registrado, como hay datos de cinco años y la vida útil del puente hipotético es de 75 años, se calculó la razón entre el índice de acumulación de daño y $5/75$, obteniéndose el porcentaje de vida útil que consumen los buses, y cuanto este aumenta producto del aumento de peso.

Posteriormente se calculó la diferencia entre los índices de acumulación de daño para el caso antes y después del aumento de peso, transformándose dicha diferencia a un número adicional de buses con el peso actual a los que equivale subirle el peso 350 kilogramos en el eje frontal a todos los buses del registro, esto al despejar el número de ciclos de carga generados por los buses en la Ecuación 2.6, una vez calculado el número de buses adicionales en 5 años, se extrapoló este valor a los 75 años de vida útil del puente, tomándose este número adicional de buses durante la vida útil como una cantidad no esperada de vehículos pesados adicional a la cantidad de camiones esperados en la fase de diseño, determinándose cuanta vida útil le reducen los 350 kilogramos adicionales al puente en función del porcentaje que representan la cantidad de buses adicionales del total de camiones esperados durante la vida útil del puente.

3.6.4 Daño considerando aumento del tráfico

Alternativamente al análisis descrito anteriormente, donde se asume que el TMDA pesado se mantendrá constante durante los 75 años de vida útil del puente, se realiza un análisis considerando la tasa de aumento del tráfico anual, que se refiere al porcentaje en el que aumenta el tráfico un año respecto al anterior, para este caso se calculó la tasa de aumento según la cantidad de pasadas

anuales de vehículos pesados registradas en la ruta 68 entre los años 2014 y 2017, esto con información obtenida desde la Dirección de General de Concesiones del MOP (MOP, 2018).

Análogamente a lo expuesto en el punto 3.6.3, se calculó la diferencia entre los índices de acumulación de daño para el caso actual y posterior al aumento de peso, con la diferencia de que en este caso para los índices de acumulación se determinaron para un periodo de 5 años, tanto para el daño real como para el esperado según diseño de acuerdo al TMDA pesado extraído del registro de Curacaví, esto para que ambos daños estén en igualdad de condiciones y la tasa de crecimiento no influya de momento.

Luego, la diferencia entre los índices de acumulación se transformó en un número adicional de buses, similar a lo realizado en el punto 3.6.3, solo que para este caso se consideró el número total de pasadas de camiones durante la vida útil del puente según el TMDA pesado extraído del registro para los primeros 5 años y luego con un TMDA pesado creciente de acuerdo a la tasa de aumento calculada para los 70 años restantes.

3.7 Softwares utilizados

Para el proceso de control de calidad de la base datos, cálculos de momento y corte, gráficos de distribución normal inversa y percentiles se utilizó Jupyter Notebook, un software de programación gratuito que utiliza lenguaje de Python, adicionalmente se utilizó Excel para almacenar los resultados de momento y corte entregados por Jupyter para cada uno de los buses del registro, además de utilizarse para determinar los aumentos de la demanda producto del peso adicional y finalmente para realizar todos los cálculos relacionados al análisis de deterioro.

3.8 Conclusiones

En este capítulo se plantearon las metodologías, datos y software utilizadas para determinar los efectos a corte, momento y fatiga generados por el tránsito real de buses interurbanos y como estos se comparan con los esperados de acuerdo a los patrones de cargas y camiones utilizados en el diseño de puentes en Chile, basándose dicha metodología en la revisión bibliográfica realizada previamente y presentándose sus resultados en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4 EFECTOS DEL TRÁNSITO DE BUSES INTERURBANOS EN PUENTES

4.1 Introducción

En esta sección se presentan los resultados obtenidos utilizando las metodologías propuestas en el capítulo anterior para cada uno de los objetivos específicos, se incluyen diversos gráficos y Tablas para facilitar la interpretación de los valores obtenidos, además de realizar un análisis de como cada resultado contribuye al objetivo general de la memoria.

4.2 Buses totales del registro

En los 5 años de registro se contabilizaron 2194069 buses interurbanos de eje simple frontal que cumplen los filtros especificados en el punto 3.3.1. De estos, 1413660 son buses de 2 ejes y 780409 son buses de 3 ejes. Así, los buses interurbanos representan el 26,2% de todos los vehículos registrados en la estación de Curacaví en los 5 años de estudio, además del 32,2% de los vehículos pesados del registro, siendo estos los de peso bruto mayor a 9 toneladas, ayudando estas cifras para realzar la importancia de estudio debido al gran flujo de buses interurbanos.

4.3 Aumentos en la demanda

Se determinaron las demandas promedio antes y después del aumento de peso, esto considerando los cuatro vanos de estudio y los efectos de cada bus del registro, dichos resultados se presentan en las figuras 4.1 a 4.4 divididos según la cantidad de ejes del bus:

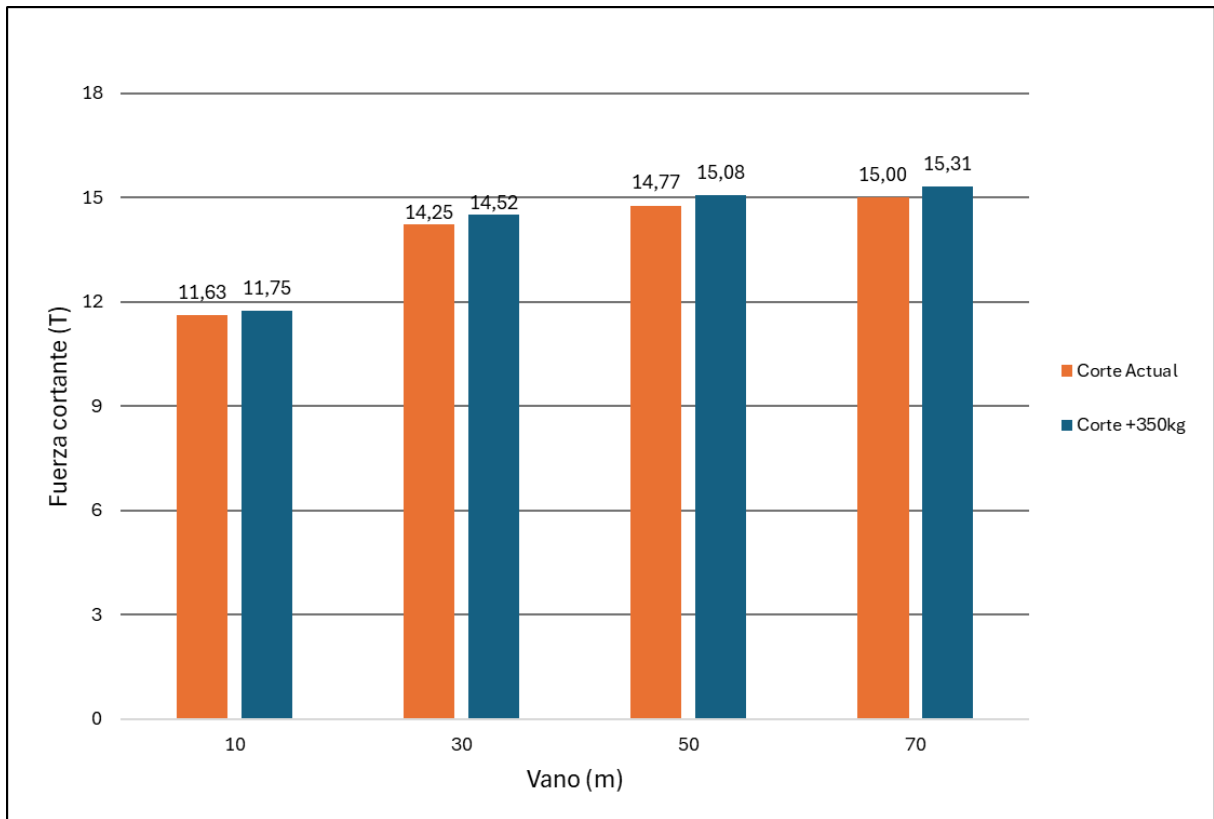


Figura 4.1 Comparación de fuerzas cortantes (buses de dos ejes)

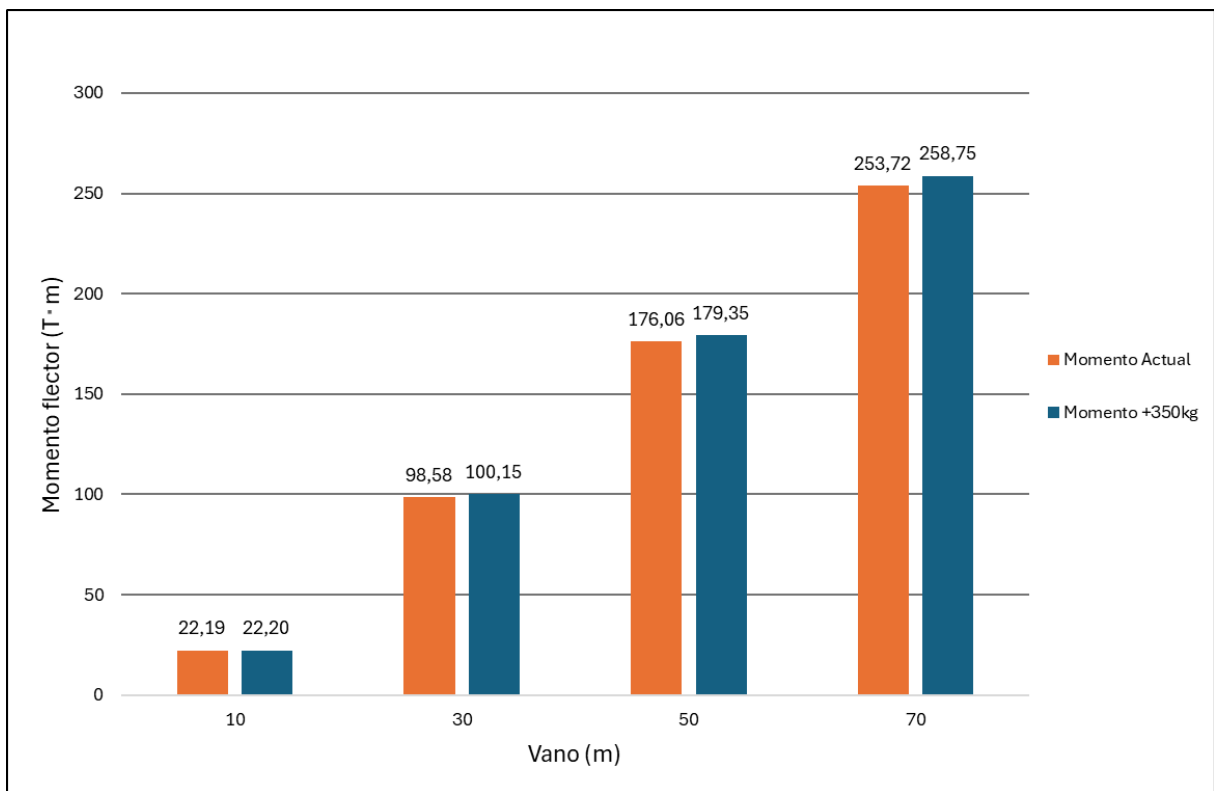


Figura 4.2 Comparación de momentos flectores (buses de dos ejes)

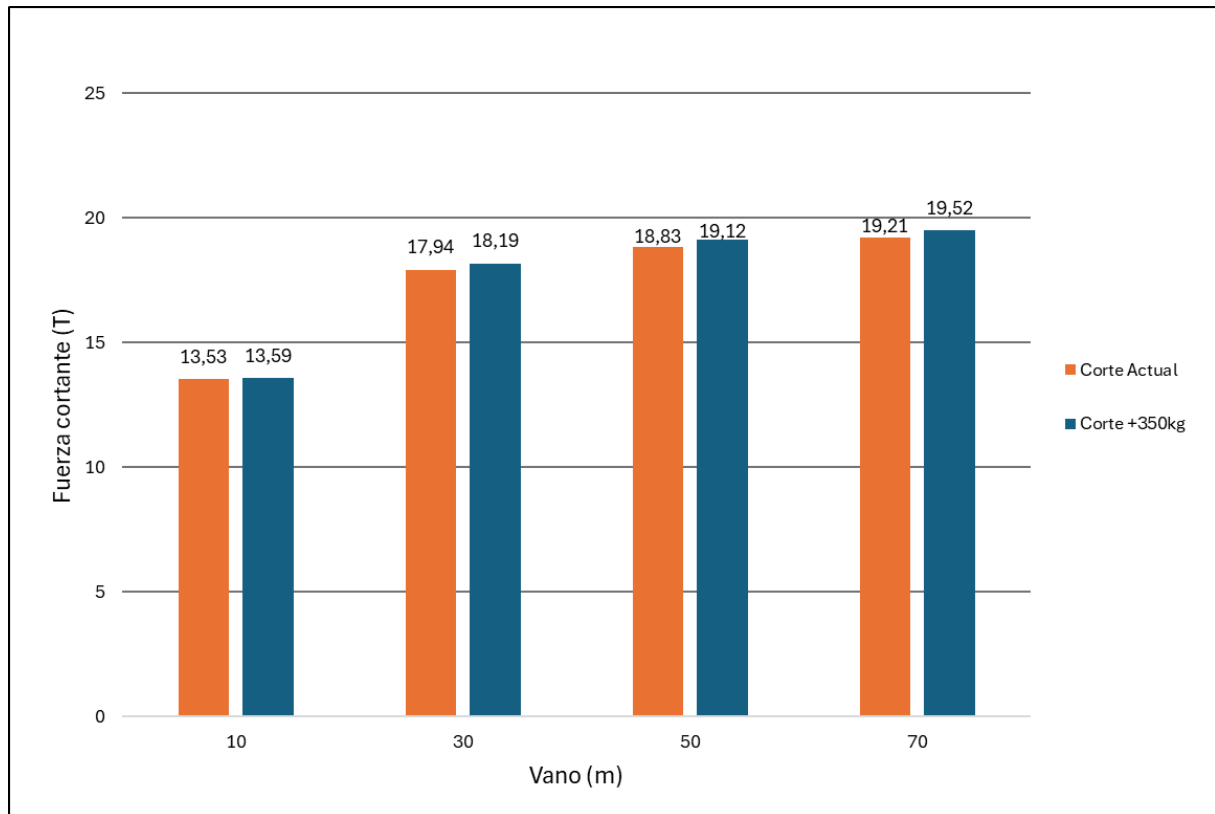


Figura 4.3 Comparación de fuerzas cortantes (buses de tres ejes)

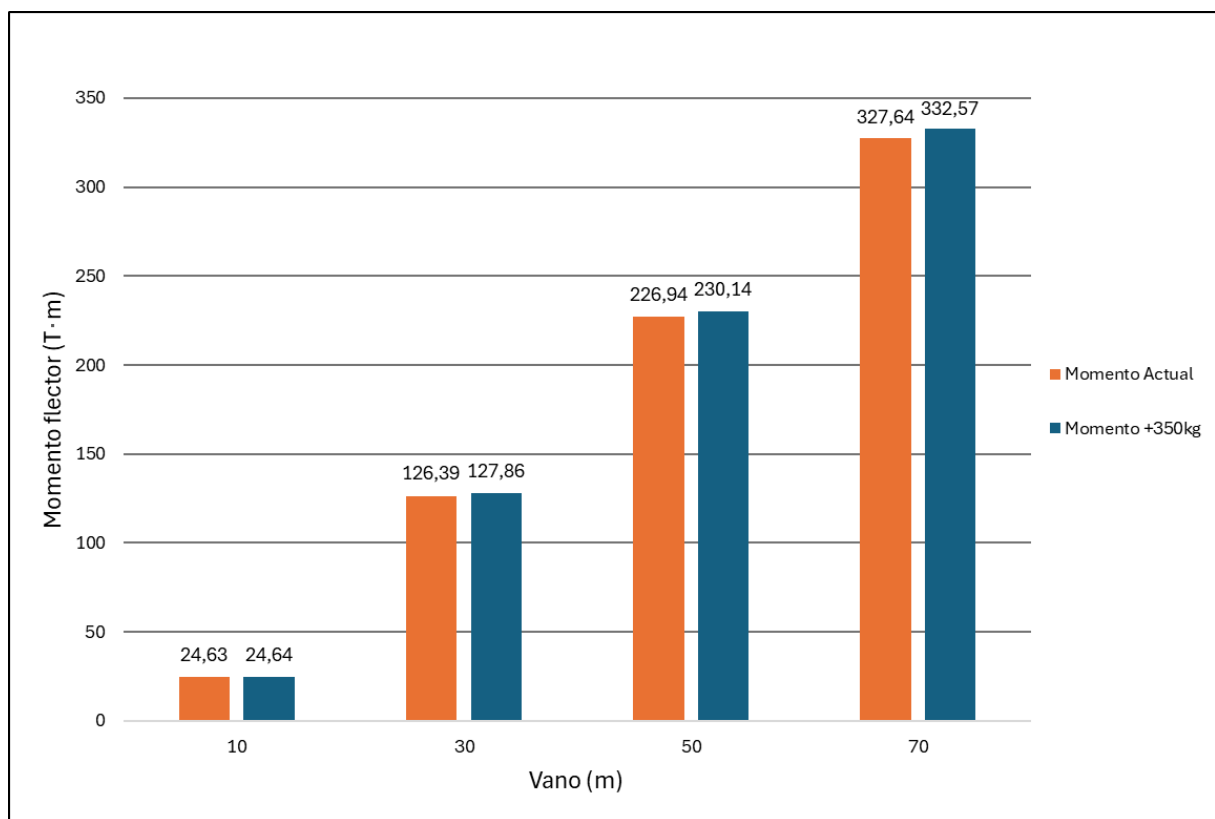


Figura 4.4 Comparación de momentos flectores (buses de tres ejes)

A partir de las Figuras 4.1 a 4.4 se desprende que los aumentos promedio de la demanda, ya sean de fuerza cortante o momento flector son muy reducidos en comparación a los valores ya existentes. Estos aumentos de la demanda son prácticamente imperceptibles en vanos cortos como el de 10 m. Los incrementos de la demanda son más notorios en vanos largos como el de 70 m, obteniéndose un aumento máximo en el promedio de 5,03 T·m para el caso del momento en buses de dos ejes, de 4,93 T·m en buses de tres ejes; y, de 0,31 T en el caso del corte en ambos tipos de buses.

Además de la comparación de los valores promedio netos mostrada se realizó un comparación de los aumentos porcentuales promedio y máximos de la demanda con respecto al caso original, tal como se detalla en el punto 3.4.2, dichos resultados se presentan en las Figuras 4.5 a 4.8, separados también por el tipo de bus, donde en el eje x se encuentran los vanos en metros mientras que en el eje y se presenta el aumento (Δ) porcentual respecto del caso original:

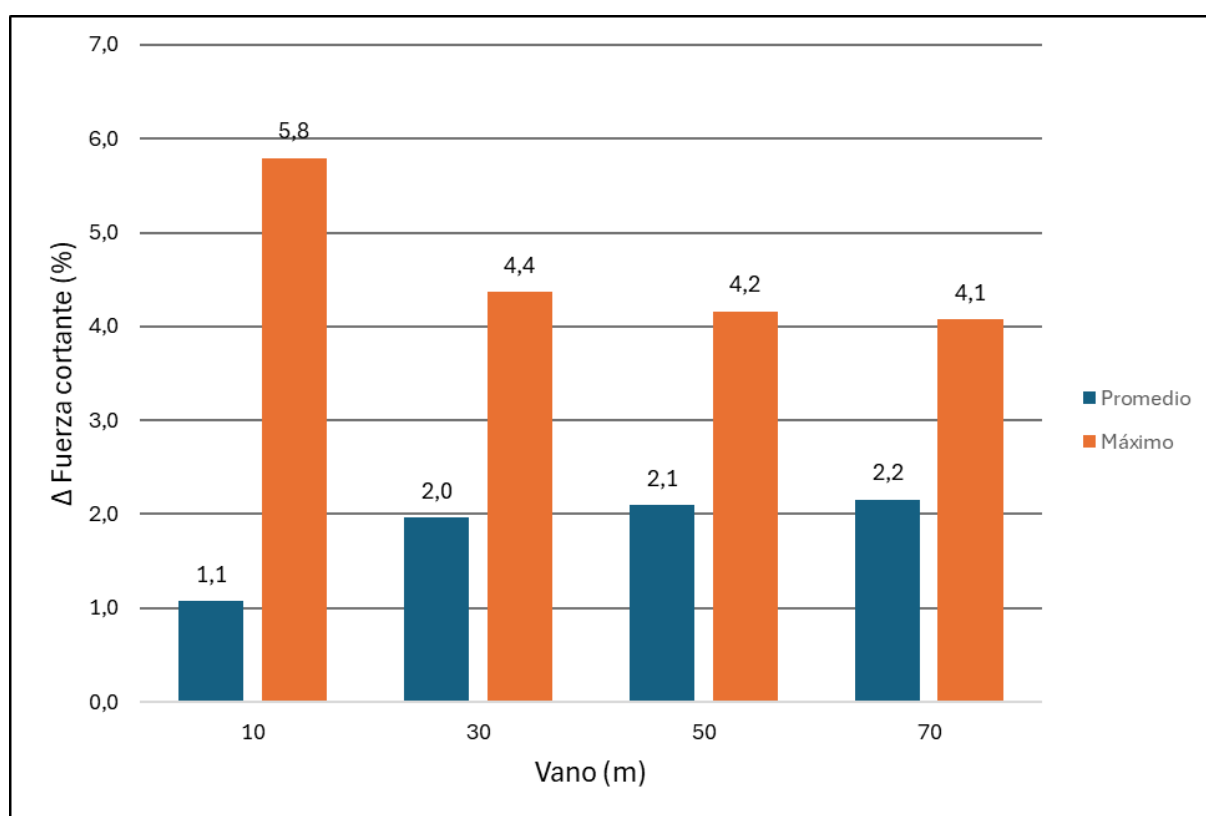


Figura 4.5 Aumentos porcentuales de fuerza cortante (dos ejes)

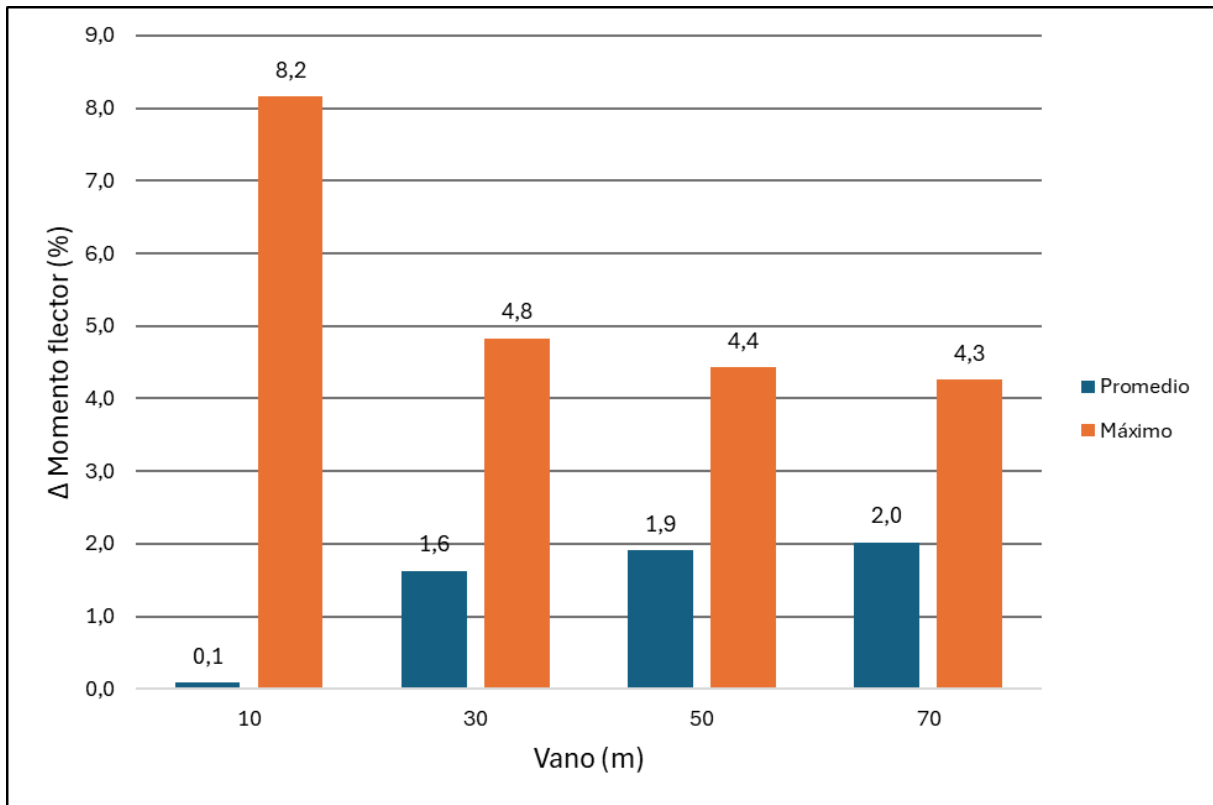


Figura 4.6 Aumentos porcentuales de momento flector (dos ejes)

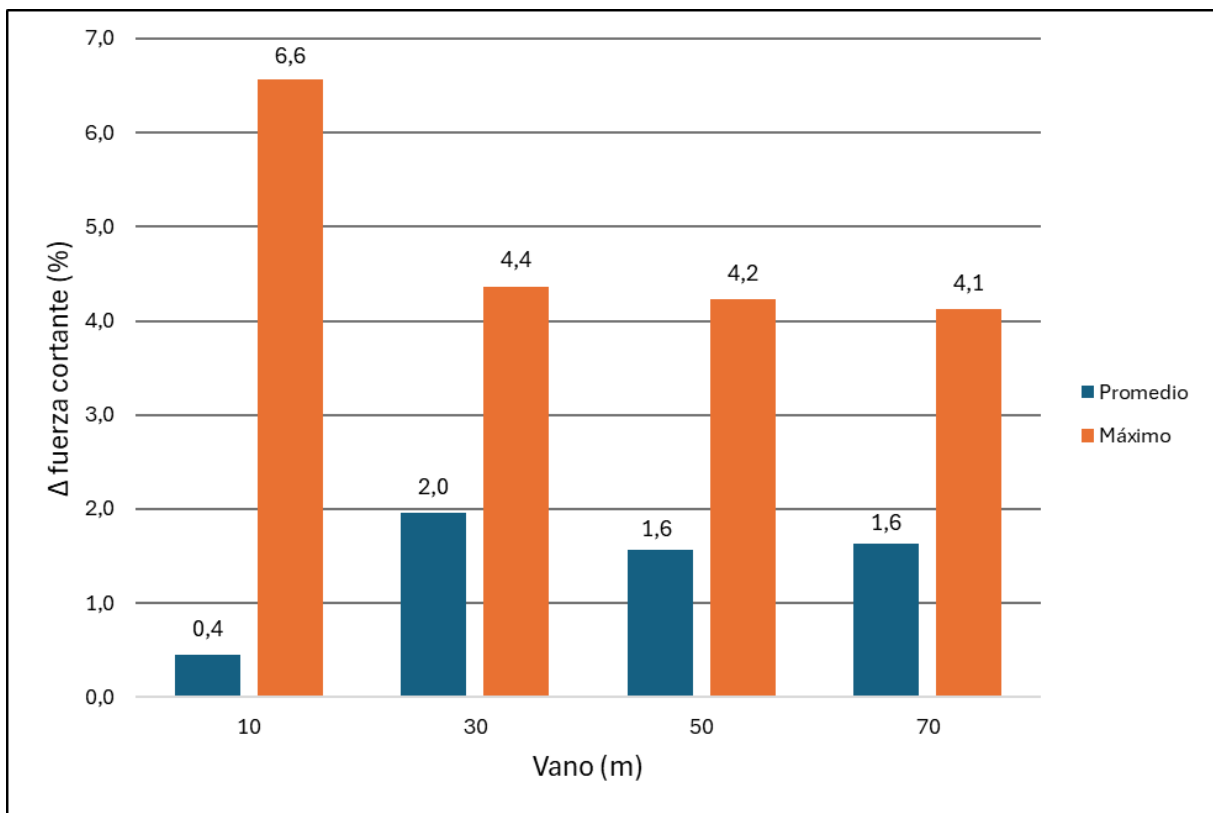


Figura 4.7 Aumentos porcentuales de fuerza cortante (tres ejes)

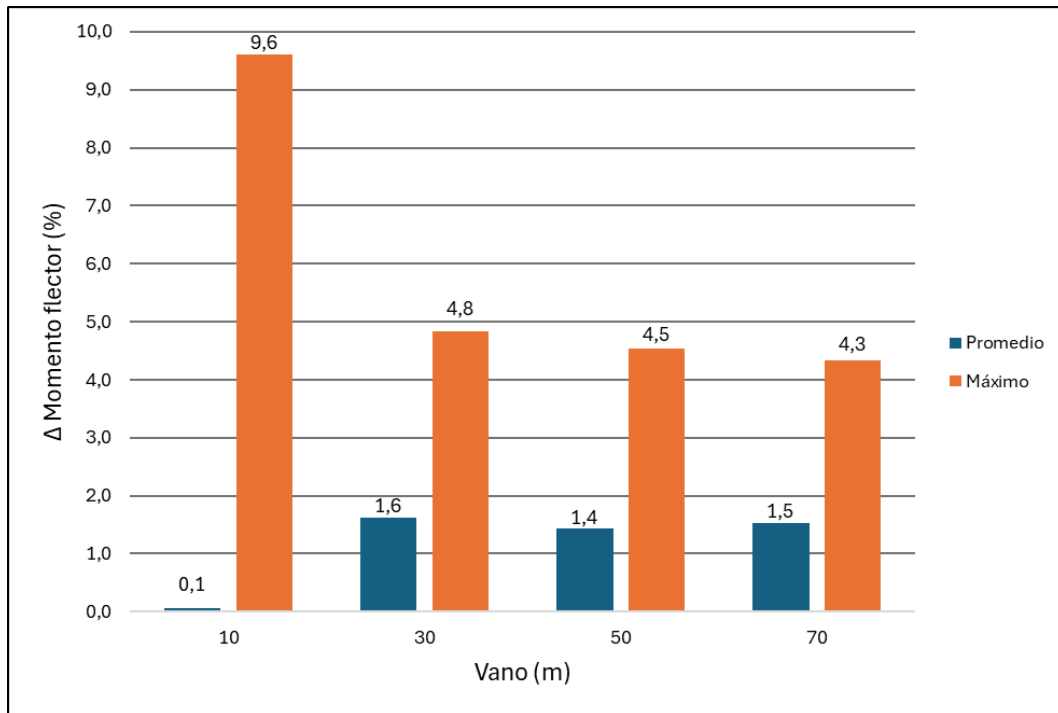


Figura 4.8 Aumentos porcentuales de momento flector (tres ejes)

Observándose que los aumentos promedios de mayor magnitud rondan el 2%, considerándose los aumentos porcentuales en general reducidos, también de los gráficos se concluye que el aumento de 350 kilogramos tiene efectos más notorios en los buses de dos ejes, lo que se debe a que en general estos buses son más livianos que los de tres ejes. También debido al peso se explica que los valores máximos se distancien tanto de los promedios, pues dichos valores se alcanzaron en los buses más livianos de la base de datos filtrada, siendo estos los que tienen un peso cercano a 9 toneladas, finalmente, los aumentos máximos de mayor magnitud se alcanzan en vanos cortos, esto debido a que la demanda original es baja en comparación y por tanto el aumento debido al peso adicional es más notorio.

4.4 Comparación con patrones de carga

Se realizó la comparación de las demandas generadas por los buses interurbanos con el peso adicional y las esperadas según los patrones de cargas HS20-44+20% del Manual de Carreteras Volumen 3 (MOP, 2023) y el HL-93 de la AASHTO LRFD (AASHTO, 2012) de acuerdo con la metodología especificada en el punto 3.5, para esto el primer paso fue determinar la demanda de los patrones de cargas para los cuatro vanos de estudio, dichas demandas se presentan en las Tablas 4.1 y 4.2 respectivamente:

Tabla 4.1 Demanda HS20-44+20%

Longitud de vano (m)	Momento flector (T·m)	Fuerza cortante (T)
10	53,51	28,04
30	248,14	35,47
50	443,83	36,96
70	726,25	45,13

Tabla 4.2 Demanda HL-93

Longitud de vano (m)	Momento flector (T·m)	Fuerza cortante (T)
10	61,87	28,13
30	313,76	43,85
50	667,36	54,61
70	1116,31	64,67

Notándose que las demandas esperadas según el HL-93 son superiores a las esperadas según el HS20-44+20%, especialmente en vanos largos.

4.4.1 Demanda buses teóricos

En las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan las demandas generadas por los buses teóricos con los pesos máximos permitidos por el departamento de pesaje, para el caso actual y después del potencial aumento de peso

Tabla 4.3 Demandas permitidas actuales

Longitud de vano (m)	$V_{2\text{ ejes}}$ (T)	$M_{2\text{ ejes}}$ (T·m)	$V_{3\text{ ejes}}$ (T)	$M_{3\text{ ejes}}$ (T·m)
10	13,27	25,03	15,5	28,83
30	16,42	113,21	20,5	145,04
50	17,05	202,82	21,5	259,8
70	17,32	292,66	21,93	374,7

Tabla 4.4 Demandas permitidas con peso adicional

Longitud de vano (m)	$V_{2\text{ ejes}}$ (T)	$M_{2\text{ ejes}}$ (T·m)	$V_{3\text{ ejes}}$ (T)	$M_{3\text{ ejes}}$ (T·m)
10	13,39	25,03	15,56	28,83
30	16,70	114,77	20,75	146,52
50	17,36	206,11	21,79	263,01
70	17,64	297,68	22,24	379,64

Además, se debe mencionar que el departamento de pesaje no establece límites individuales para los dos ejes traseros del bus de tres ejes, sino que establece un límite conjunto de 16000 kilos, para efectos de las demandas mostradas en las Tablas 4.3 y 4.4 se optó por dividir los 16000 kilos en función de los promedios de peso de los ejes 2 y 3 de buses de tres ejes registrados en la estación de Curacaví en el año 2022 en la dirección 12.

4.4.2 Comparación mediante percentiles

La comparación con patrones de carga utilizando percentiles permite visualizar las demandas de todos los vanos evaluados para un mismo registro, dicha comparación se realizó conforme a lo mencionado en el punto 3.5.2 y separando los gráficos según tipo de bus, año y dirección del tránsito, debido a temas de espacio no se incluyeron todos los gráficos, incluyéndose solo los más representativos en el cuerpo de la memoria y enviándose el resto al Anexo 4.2.

En la Figura 4.9 se grafican los percentiles de la demanda registrada en la dirección 12 para el año 2016:

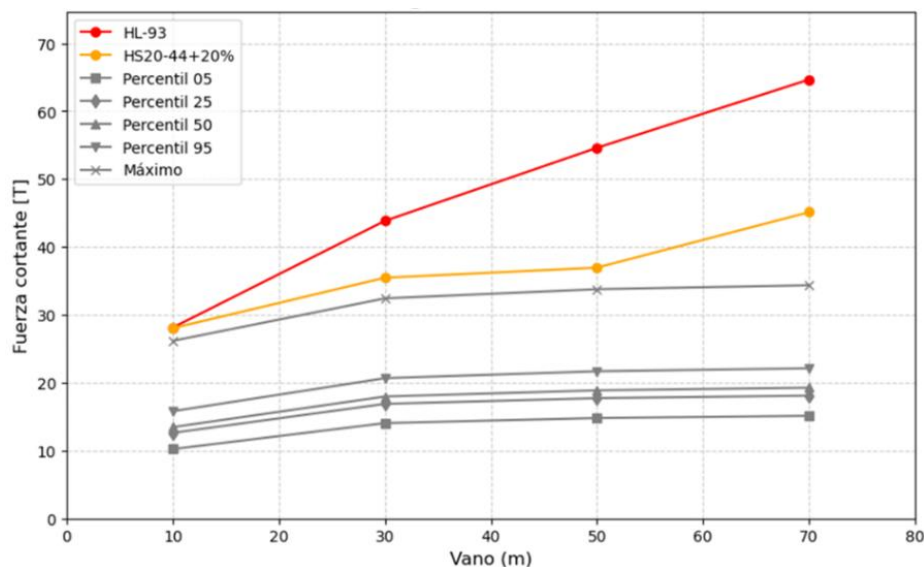


Figura 4.9 Percentiles de la demanda de corte en buses de 3 ejes (Cu12-2016)

Donde se observa que todos los buses, a pesar del aumento de peso, siguen quedando englobados dentro de ambos patrones de cargas, además es interesante notar la gran diferencia que hay entre el percentil 95 y los valores máximos, lo que se debe a que el máximo viene dado por una cantidad mínima de buses cuyo peso bruto se distancia mucho del peso del resto. Una situación similar se observa en las demandas a momento flector del mismo registro en la Figura 4.10:

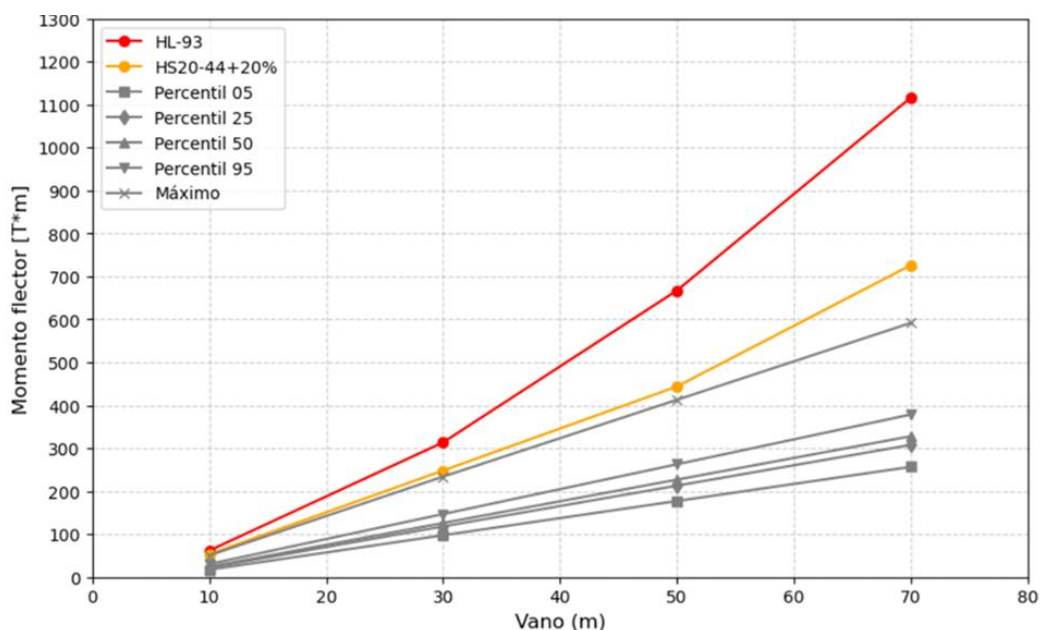


Figura 4.10 Percentiles de la demanda de momento en buses de 3 ejes (Cu12-2016)

Figura en la que nuevamente se aprecia que la demanda a momento flector de todos los buses con peso adicional queda englobada dentro de lo que se espera según patrones de cargas, además de volverse observar una diferencia considerable entre el percentil 95 y el máximo.

En la Figura 4.11 se presenta la comparación de percentiles de corte y patrones de carga para el registro del año 2018 en la dirección 34:

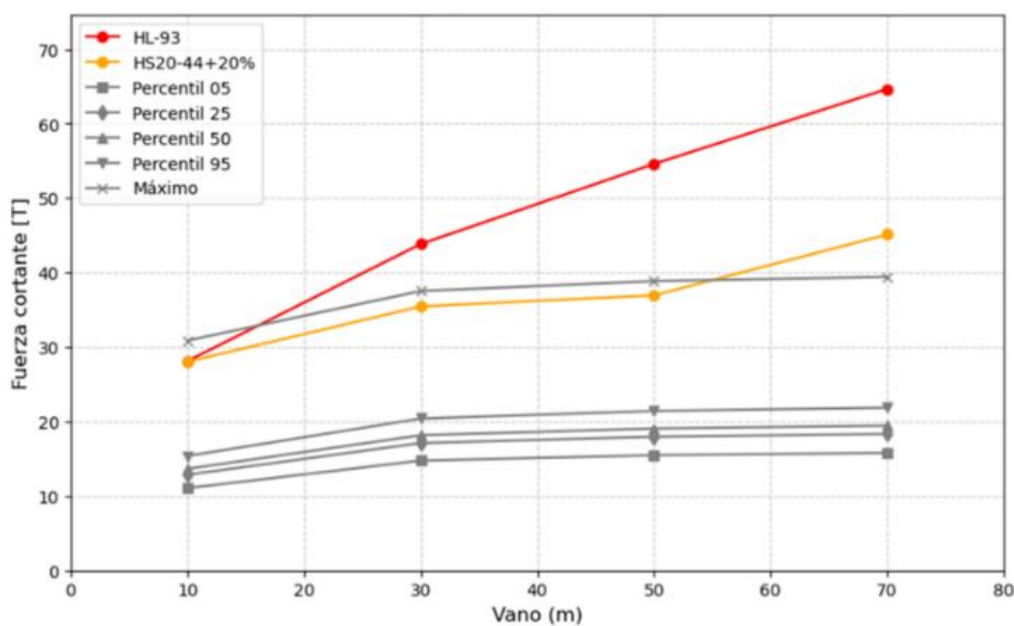


Figura 4.11 Percentiles de la demanda de corte en buses de 3 ejes (Cu34-2018)

En la que destaca que la demanda máxima supera a ambos patrones de cargas en el vano de 10 m, y al HS20-44+20% en los vanos de 30 y 50 metros, sin embargo, se observa que la diferencia entre el máximo y el resto de buses es aún más grande que en el caso anterior, lo que denota que el bus que genera el corte máximo se trata de un *outlier* que no es representativo del comportamiento del registro que en general está englobado por los patrones de carga. Situación similar a la comparación de momentos flectores en la Figura 4.12:

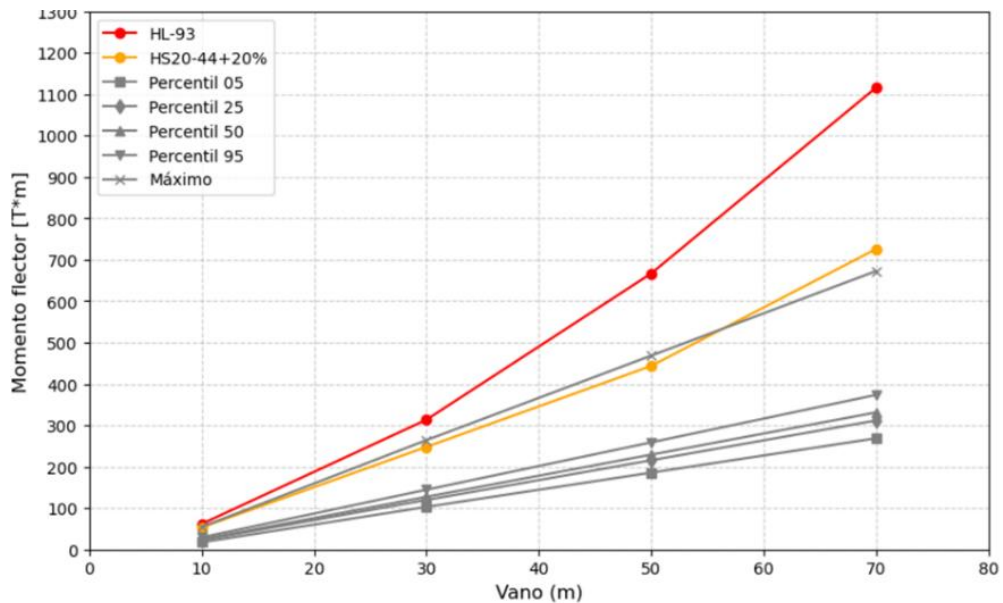


Figura 4.12 Percentiles de la demanda de momento en buses de 3 ejes (Cu34-2018)

En las Figuras 4.13 y 4.14 se presentan la comparación de percentiles para el registro del año 2022 en la dirección 12:

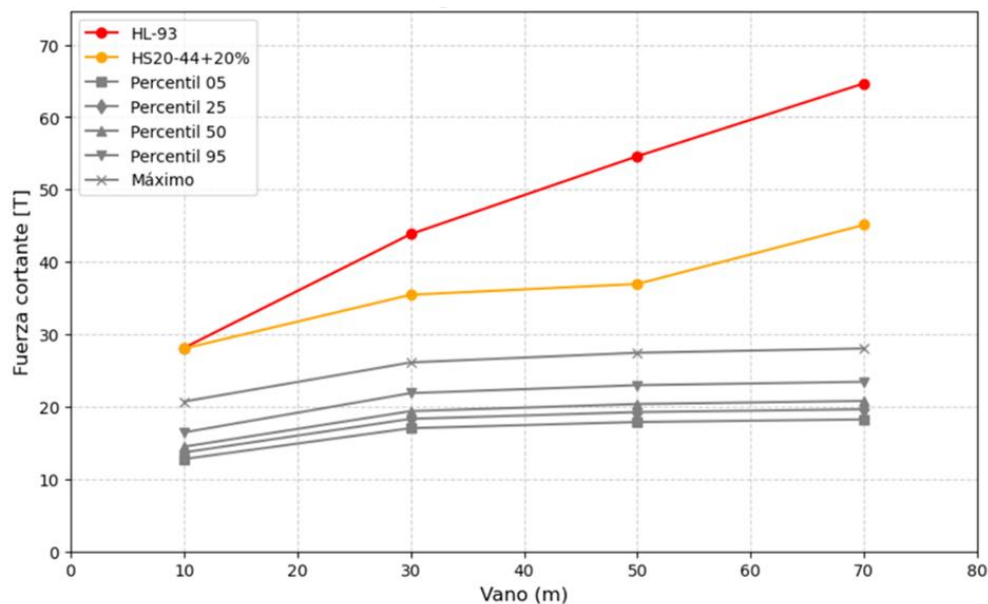


Figura 4.13 Percentiles de la demanda de corte en buses de 3 ejes (Cu12-2022)

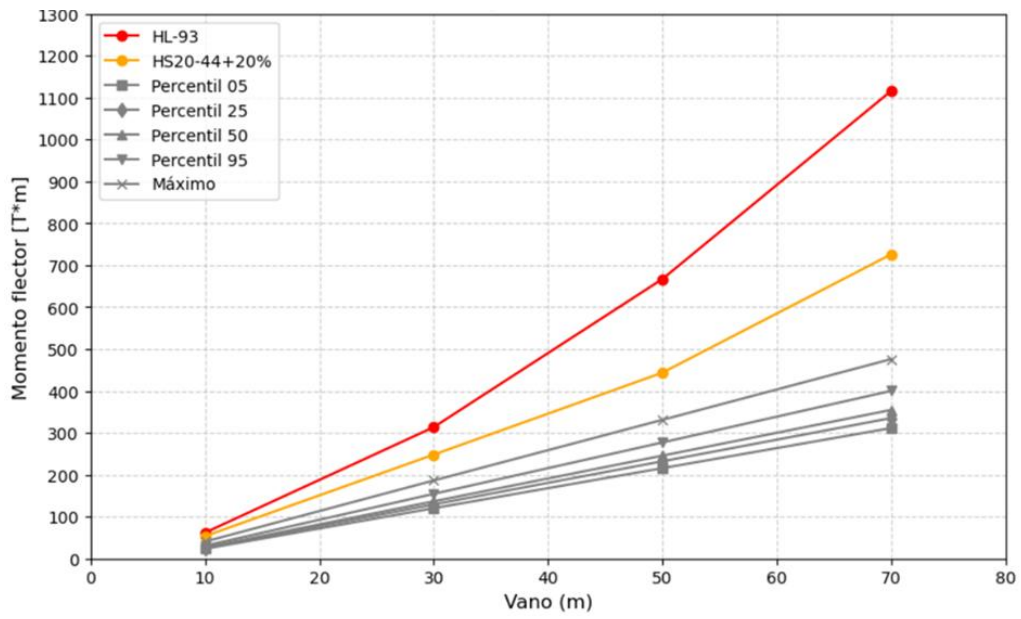


Figura 4.14 Percentiles de la demanda de momento en buses de 3 ejes (Cu12-2022)

Registro en el que nuevamente los buses quedan en su totalidad englobados por ambos patrones de carga, observándose una menor diferencia entre el percentil 95 y el máximo en este caso.

4.4.3 Comparación vano de 10 metros

En esta sección se presentan los gráficos de probabilidad acumulada en escala normal en función del tipo de bus, año, dirección del tránsito y patrón de cargas comparado, por temas de espacio no se incluyen todos los gráficos, seleccionándose únicamente los más representativos y presentándose el resto en el Anexo 4.1.

En la Figura 4.15 se presenta la distribución inversa normal de la razón entre el corte real generado por buses de 3 ejes y el esperado según diseño de acuerdo al HS20-44+20%:

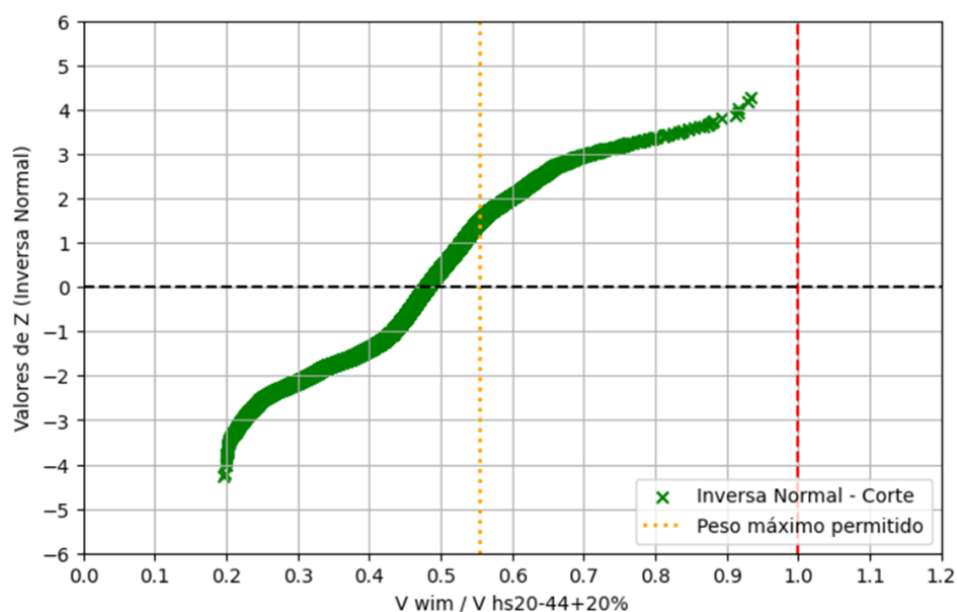


Figura 4.15 Vano de 10 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2016)

Donde en el eje x corresponde a la razón entre la demanda real sobre la demanda esperada en el diseño, mientras que el eje y es la probabilidad acumulada de obtener valores menores a cada razón, expresada en términos de Z de la distribución normal, que se refiere a cuantas desviaciones estándar se aleja un valor de la media, que es la intercepción con $Z=0$, lo más destacable del gráfico es que la demanda máxima de diseño, representada por la línea roja en la razón igual a 1, nunca se supera, lo que significa que todos los buses a pesar del aumento de peso siguen estando dentro de lo esperado según el HS20-44+20%, también es importante notar que algunos buses se aproximan al máximo, sin embargo estos tienen un Z mayor a 4, lo que significa que representan menos de un 0,01% del registro, interesante es también que, la mediana, que es la intercepción con $Z=0$, se alcanza en una razón de aproximadamente 0,48, lo que significa que el 50% de los buses produce una demanda inferior a la mitad de lo esperado en el diseño.

Por último, se observa que el peso máximo permitido por el departamento de pesaje, que es la línea vertical naranja, intercepta al gráfico en un Z de alrededor de 1,5, lo que significa que aproximadamente el 7% de los buses excede el corte generado por el bus con el peso máximo permitido.

Conclusiones similares pueden obtenerse de la comparación de momentos en la Figura 4.16:

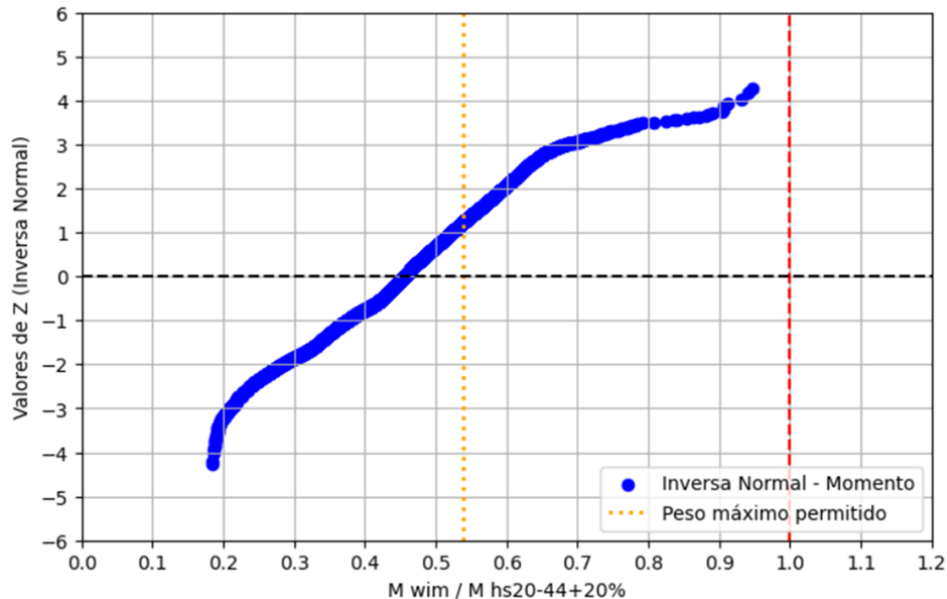


Figura 4.16 Vano de 10 metros, momento buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2016)

Notándose que la razón de momentos igual a 1 no es superada por ningún bus, además, los buses que se aproximan tienen un Z de alrededor de 4 nuevamente, por lo que representan un porcentaje ínfimo del registro, por otro lado, se observa que la mediana ahora es un poco menor incluso, interceptando en una razón de 0,46 aproximadamente, mientras que el peso máximo permitido intercepta al gráfico en un Z cercano a 1,2, lo que significa que un 12% de los buses del registro superan los momentos flectores generados por el bus con el peso máximo establecido por el departamento de pesaje.

Análogamente, se realiza la comparación con el patrón HL-93, siendo este un patrón más exigente que el HS20-44+20%, en la Figura 4.17 se presenta la comparación del corte generado por los buses del mismo registro con el esperado según el HL-93:

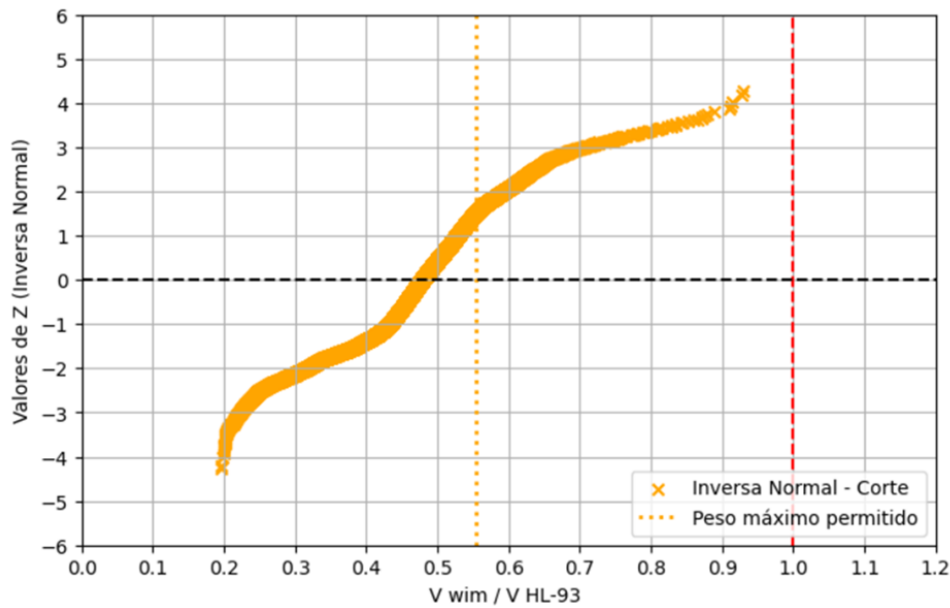


Figura 4.17 Vano de 10 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2016)

Figura en la que se aprecian resultados similares a la comparación anterior: todos los buses quedan englobados por el patrón de cargas y solo un porcentaje mínimo del registro se aproxima al máximo, quedando la mediana en razones alrededor del 0,5 nuevamente, con un porcentaje similar de buses que excede la demanda generada por el bus con el peso máximo normativo. Por último, se debe mencionar que las demandas de corte en un vano de 10 m del HS20-44+20% y el HL-93 son prácticamente iguales, lo que explica por qué no hay gran diferencia en los gráficos. No así en el caso del momento, donde si se nota que el HL-93 es más exigente, como se observa en la Figura 4.18:

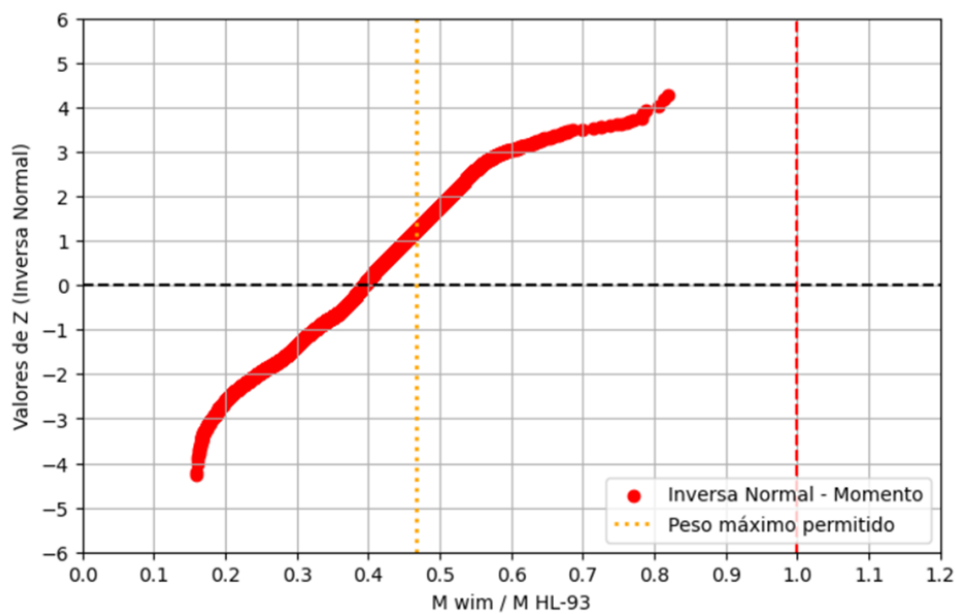


Figura 4.18 Vano de 10 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2016)

Observándose que las razones de demandas disminuyen debido a la mayor exigencia del HL-93, lo que provoca que el gráfico se desplace hacia la izquierda alejándose del máximo de diseño, con las razones más altas siendo poco mayores a 0,8 y con una mediana de alrededor de 0,4 de razón entre demandas.

4.4.4 Comparación vano de 30 metros

En este vano se efectuarán las comparaciones con patrones de cargas utilizando buses de 2 y 3 ejes, con el objetivo de ilustrar las diferencias en los efectos generados por ambos. Primero, en las Figuras 4.19 y 4.20 se muestran las comparaciones de buses de 2 ejes y el HS20-44+20%:

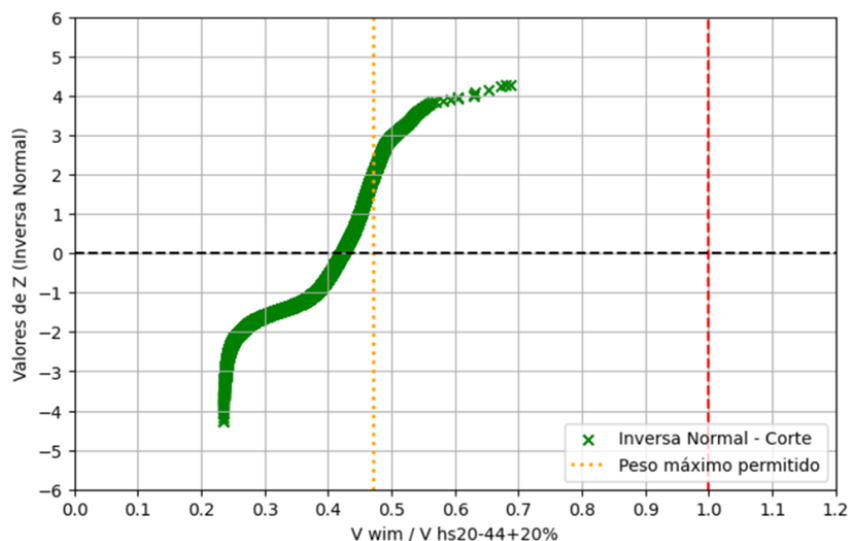


Figura 4.19 Vano de 30 metros, corte buses de 2 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)

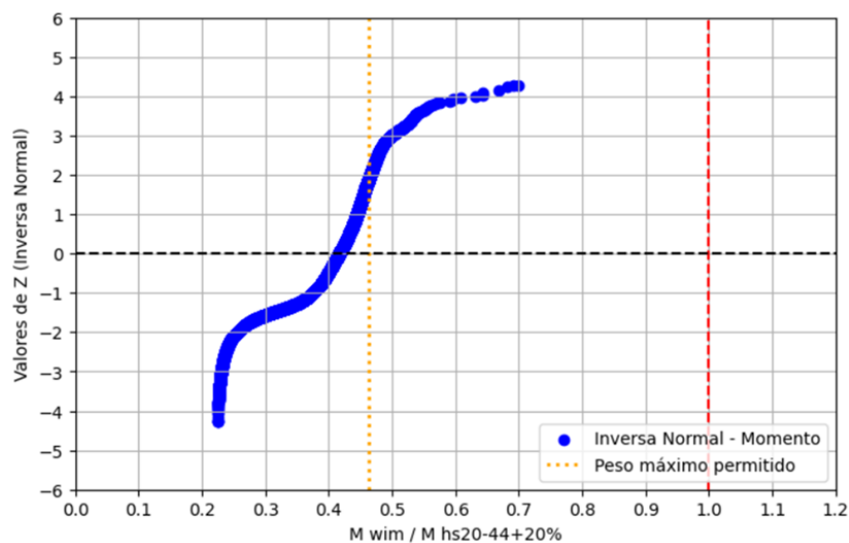


Figura 4.20 Vano de 30 metros, momento buses de 2 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)

Gráficos en los que se denota que las razones disminuyeron considerablemente, esto ya que la demanda generada por los buses de 2 ejes es menor debido a que tienen un peso bruto menor que los buses de 3 ejes en general, observándose que las razones máximas apenas alcanzan el 0,7 y que estas siguen teniendo un Z mayor a 4, por lo que representan un porcentaje muy pequeño del total, también se observa que la mediana es poco mayor a la razón de 0,4 entre demandas reales y de diseño, respecto de los pesos máximos normativos, se observa que aproximadamente un 5% de los buses reales supera las demandas del bus de 2 ejes con el peso máximo permitido.

En las Figuras 4.21 y 4.22 se grafica la comparación de la demanda de buses de 2 ejes y el HL-93:

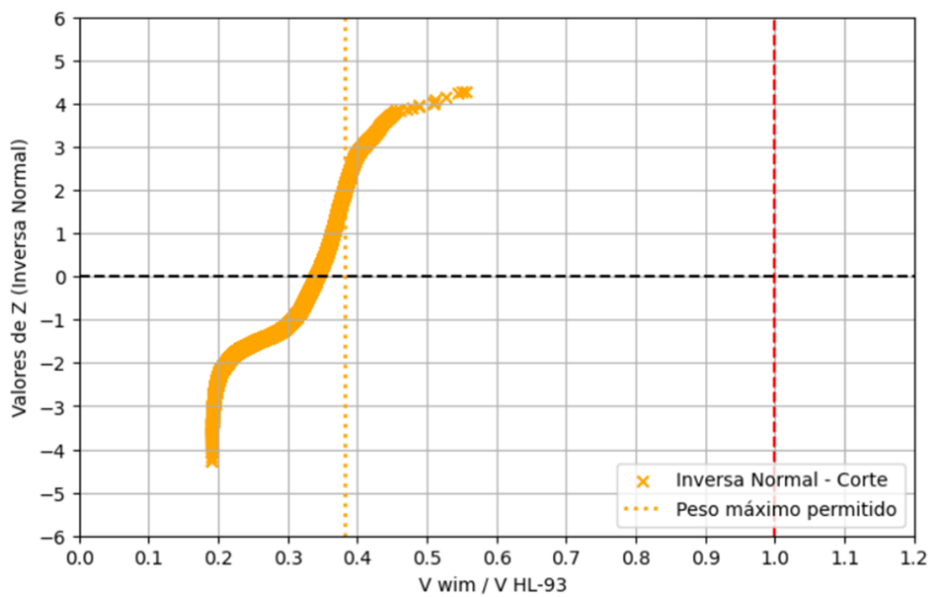


Figura 4.21 Vano de 30 metros, corte buses de 2 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018)

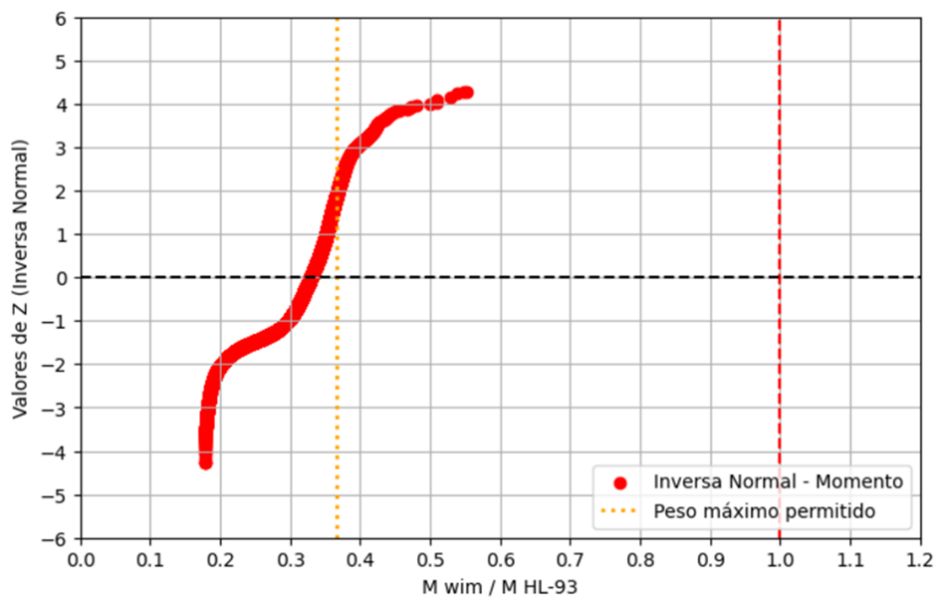


Figura 4.22 Vano de 30 metros, momento buses de 2 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018)

Observándose que las razones son aún menores al compararse con el HL-93, esto debido a que en vanos de 30 metros la diferencia entre las demandas del HL-93 y HS20-44+20% ya es notoria, quedando la razón máxima entre demandas de buses de 2 ejes y HL-93 un poco por encima de 0,55, mientras que la mediana queda alrededor de 0,35. Posteriormente se realiza la comparación con buses de 3 ejes en las Figuras 4.23 y 4.24:

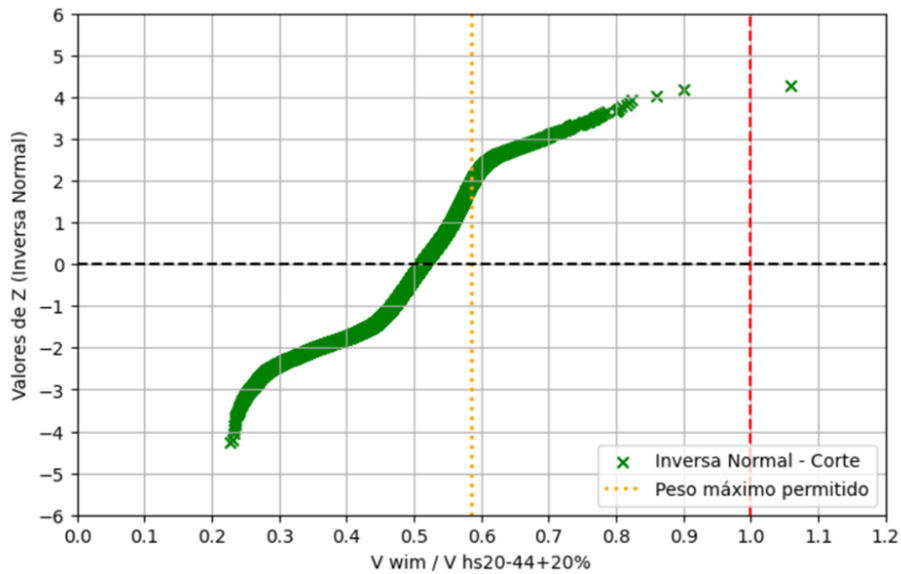


Figura 4.23 Vano de 30 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)

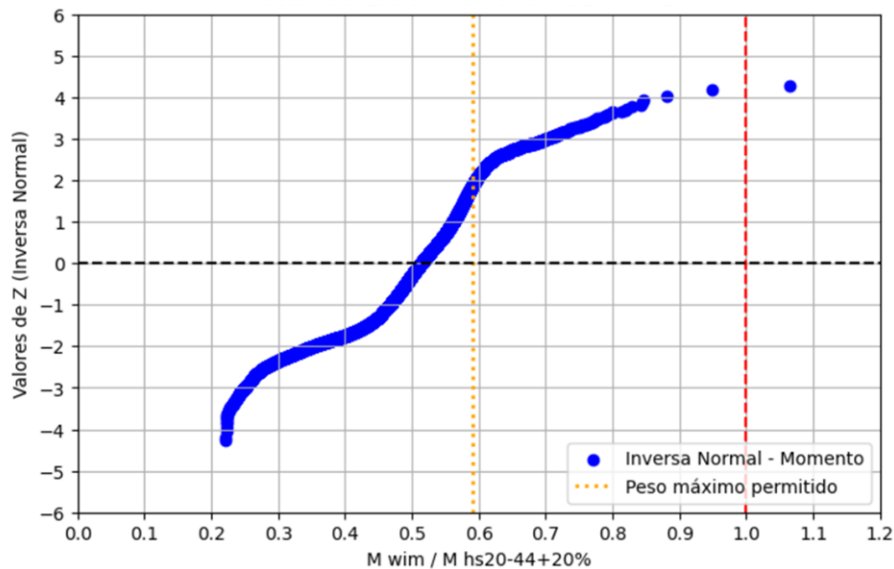


Figura 4.24 Vano de 30 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-34, 2018)

Observándose que las demandas aumentan sustancialmente respecto de los buses de 2 ejes, llegando incluso a superarse la demanda máxima de diseño por un bus, sin embargo, este bus tiene un $Z=4,2$, por lo que representa aproximadamente el 0,001% de los buses del registro y se puede catalogar como un *outlier*, mientras que la mayoría de buses sigue cumpliendo con diseño.

La comparación de la demanda generada por buses de 3 ejes y el HL-93 se muestra en las Figuras 4.26 y 4.27:

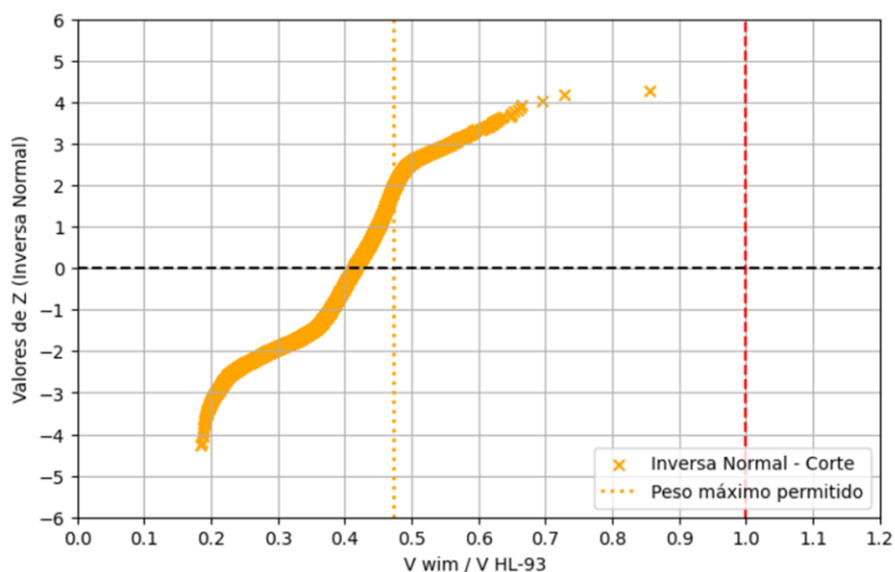


Figura 4.25 Vano de 30 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018)

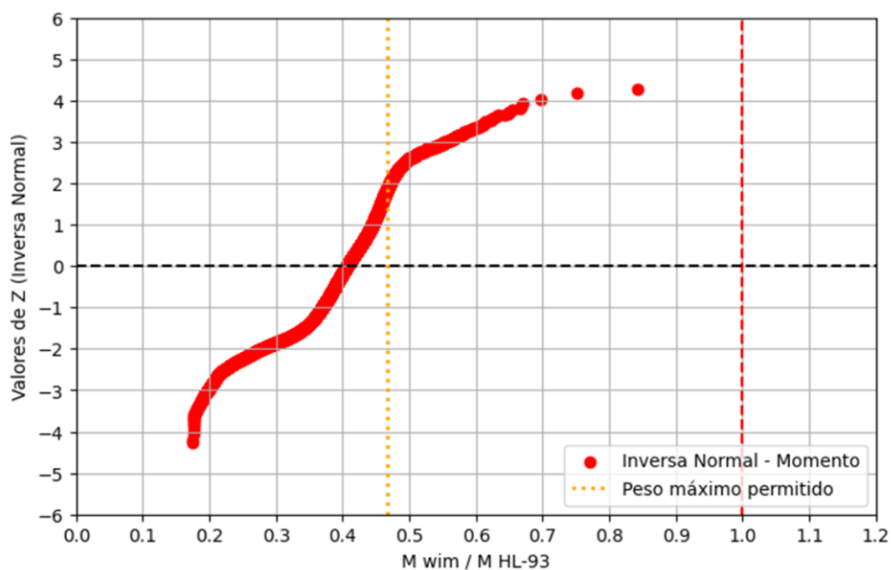


Figura 4.26 Vano de 30 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-34, 2018)

Donde se aprecia una marcada disminución en las razones entre demandas debido a la mayor exigencia del HL-93, notándose esto en que ahora la totalidad de buses con peso adicional están englobados por el patrón de cargas, observándose que el *outlier* ahora ni siquiera alcanza razones de 0,9, mientras que la mediana de los datos pasó de ser 0,5 en el caso del HS20-44+20% a 0,4 en el caso del HL-93.

4.4.5 Comparación vano de 50 metros

Debido a que la gran mayoría de buses de 2 ejes cumple holgadamente con lo esperado según ambos patrones de cargas, el resto de resultados presentados en este capítulo se enfocaran en buses de 3 ejes, incluyéndose el resto de los gráficos de 2 ejes en el Anexo 4.1.

En el caso de vanos de 50 metros se observan resultados cercanos a los vistos para vanos más cortos, observándose que los buses cumplen con ambos patrones de cargas y con bastante holgura respecto del HL-93, tal como se evidencia en las Figuras 4.27 a 4.30:

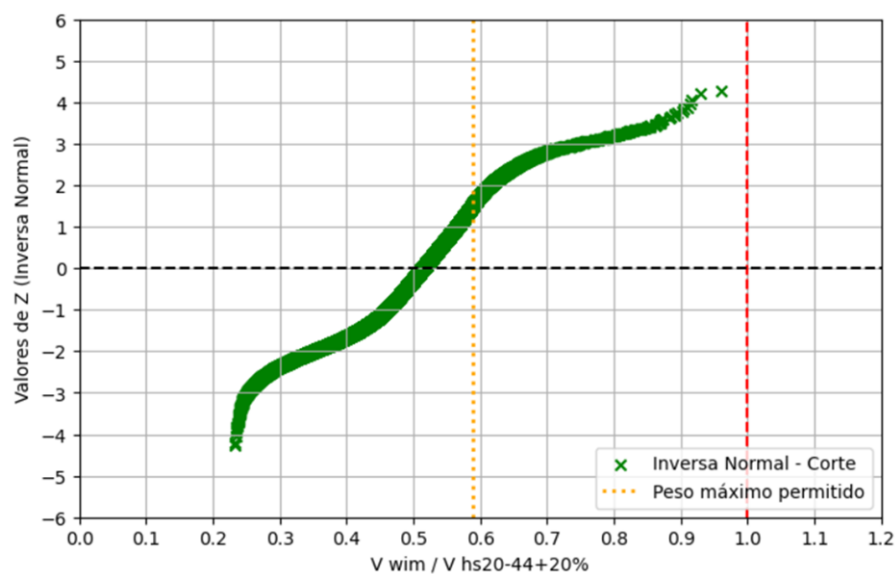


Figura 4.27 Vano de 50 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)

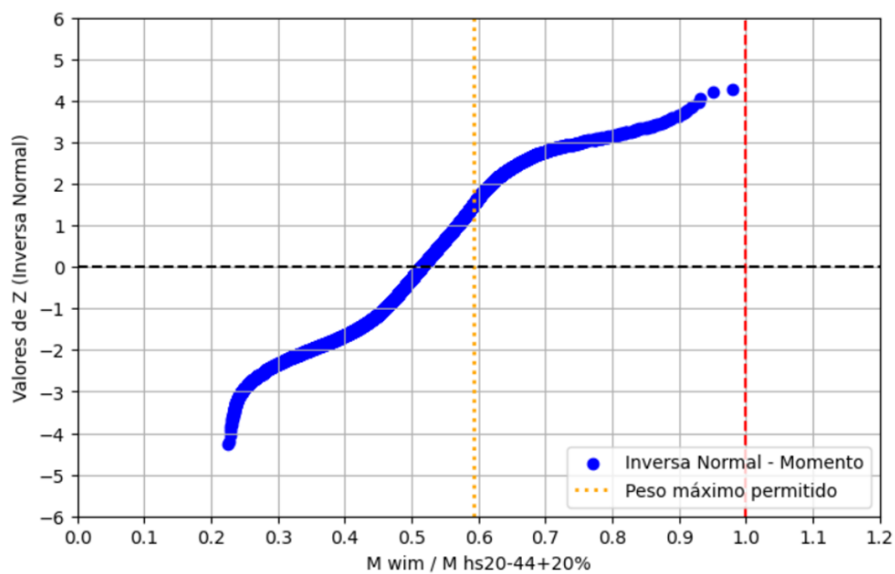


Figura 4.28 Vano de 50 metros, momento buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)

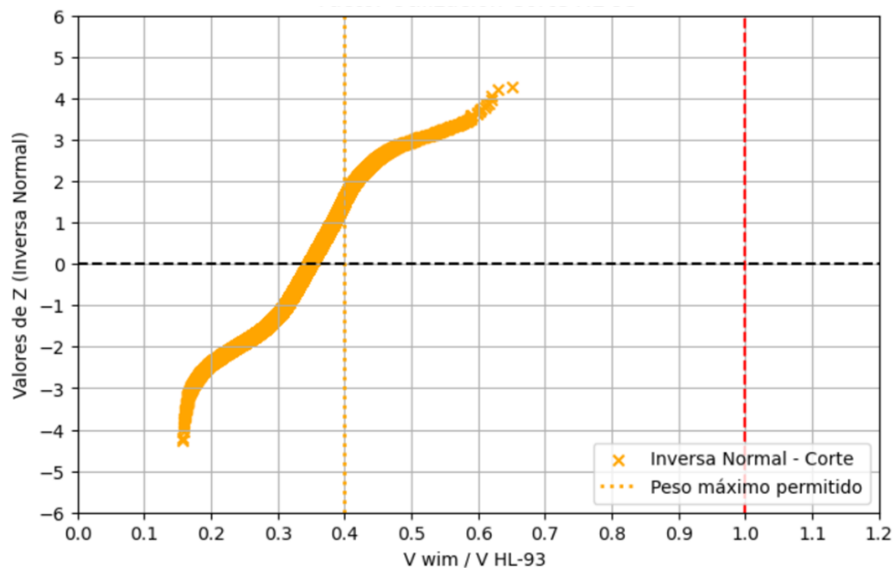


Figura 4.29 Vano de 50 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017)

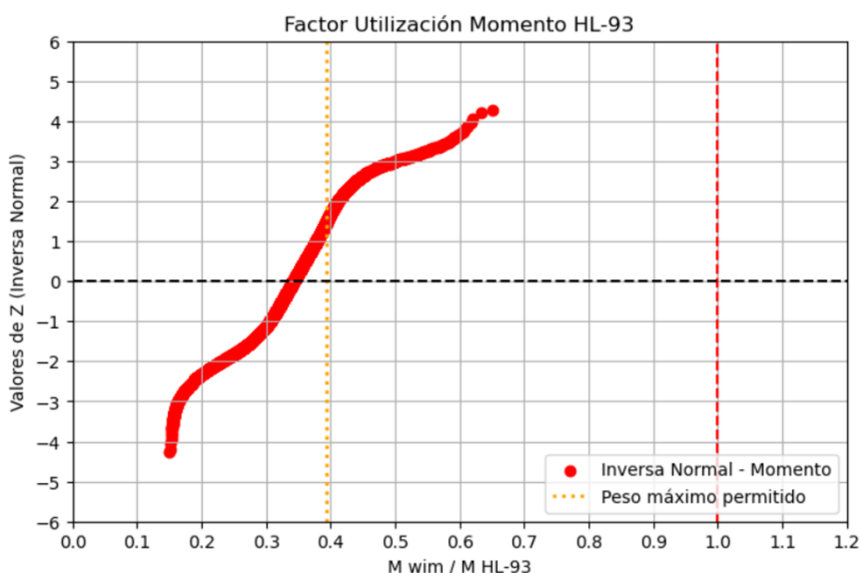


Figura 4.30 Vano de 50 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017)

Notándose que todos los buses quedan englobados dentro de ambos patrones de cargas, con un porcentaje mínimo de buses que se aproximan al máximo de diseño del HS20-44+20% pero sin llegar a superarlo, alcanzándose una mediana de poco más de 0,5 de razones entre demandas, mientras que en la comparación con el patrón HL-93 se observa una considerable reducción en las razones, lo que se evidencia en que el gráfico se desplaza hacia la izquierda, con razones máximas de aproximadamente 0,65 de la demanda diseño tanto para corte como momento, finalmente, se observa que la mediana de las razones de demandas en el caso del HL-93 es cercana a 0,35 en comparación al 0,5 que había respecto del HS20-44+20%.

4.4.6 Comparación vano de 70 metros

En la imagen 4.31 se muestra la comparación de la demanda generada por buses de 3 ejes con la esperada según el HS20-44+20%

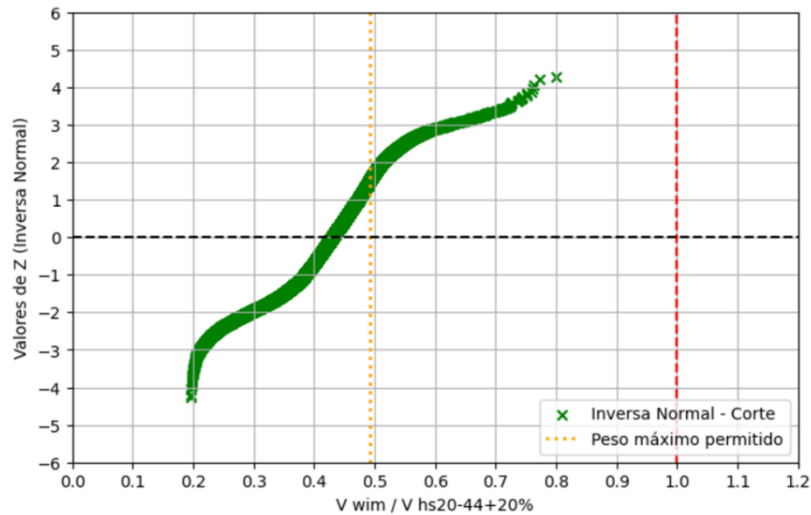


Figura 4.31 Vano de 70 metros, corte buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)

Donde se aprecia una reducción en las razones de demandas y un desplazamiento en general del gráfico hacia la izquierda, lo que se debe a que en vanos largos como el de 70m empieza a controlar el caso de carga de faja en el patrón HS20-44+20%, lo que produce una demanda mucho mayor a la obtenida para vanos más cortos, esto se evidencia en que la razón máxima de corte es de 0,8, muy alejada del máximo, y también en una disminución de la mediana de los datos, que ahora pasó a ser un poco menor a 0,45 de las razones de demandas, resultados similares se pueden apreciar en la comparación de momentos del HS20-44+20% en la Figura 4.32:

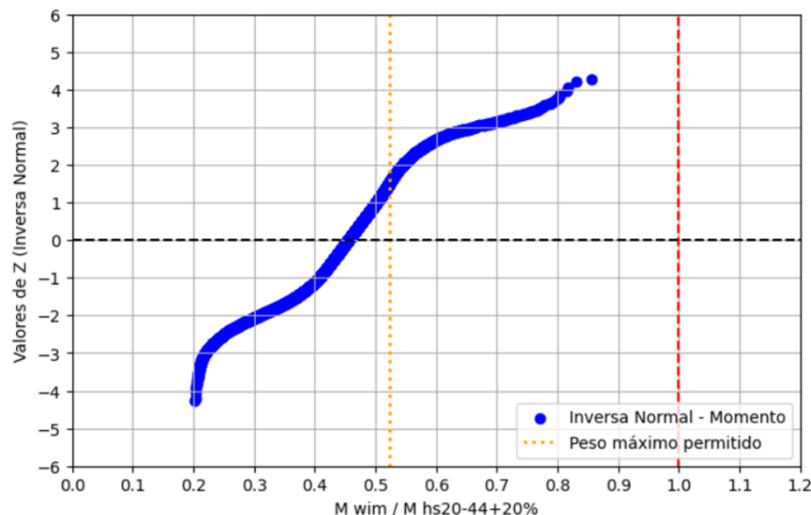


Figura 4.32 Vano de 70 metros, momento buses de 3 ejes / HS20-44+20% (Cu-12, 2017)

Donde la razón máxima está alejada de lo esperado según diseño, llegando a ser poco más de 0,85, observándose también una pequeña reducción en la mediana respecto de la determinada para los vanos de 30 m y 50 m.

En las Figuras 4.33 y 4.34 se muestra la comparación ahora respecto del HL-93:

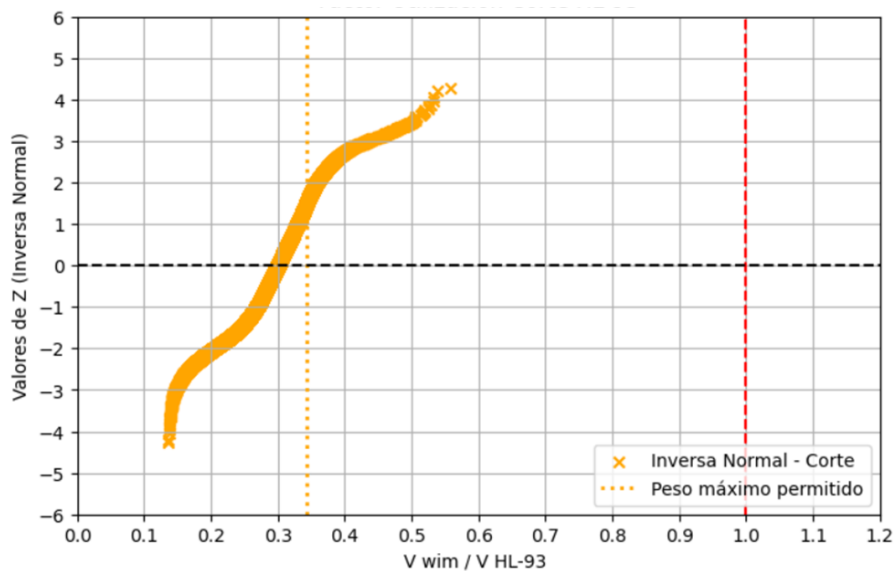


Figura 4.33 Vano de 70 metros, corte buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017)

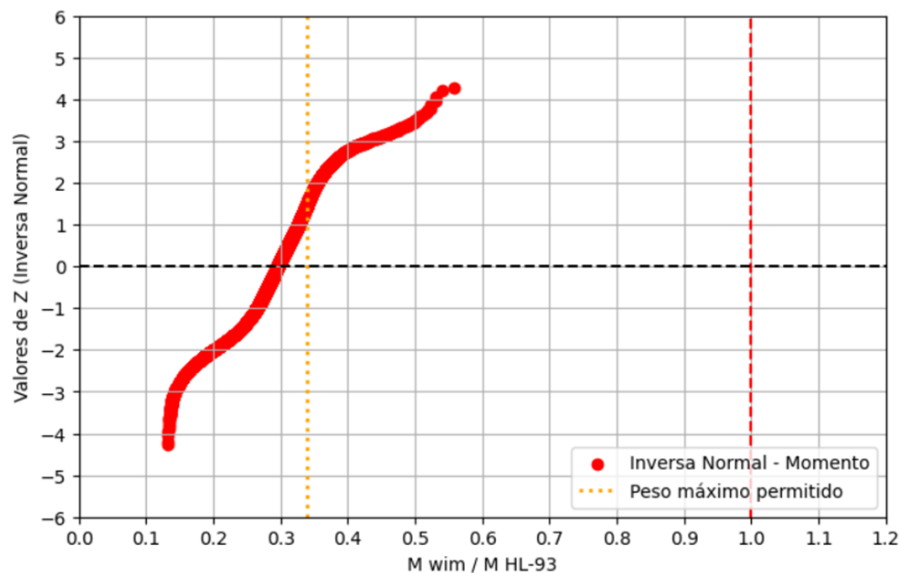


Figura 4.34 Vano de 70 metros, momento buses de 3 ejes / HL-93 (Cu-12, 2017)

Donde se hace notar nuevamente el efecto de la carga de faja en la demanda de diseño, reduciéndose las razones respecto a vanos anteriores, obteniéndose demandas máximas de poco más de un 0,55 de lo esperado según el HL-93 en corte y momento, observándose además que la mediana de las razones es aproximadamente 0,3 de la demanda máxima de diseño.

4.5 Deterioro adicional por fatiga

Siguiendo la metodología utilizada por Babu (2019), detallada en los procedimientos mencionados en el capítulo 3, se determinó el deterioro y reducción de la vida útil del puente tipo definido en el punto 3.6 producto del peso adicional.

4.5.1 Momento equivalente

Se calculó el momento equivalente generado por los buses antes y después del aumento de peso según la Ecuación 2.4 y los supuestos establecidos en el punto 3.6.1, registrándose 2194069 buses en total en los 5 años de datos y obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 4.5 Momentos equivalentes

Momento	Valor	Unidades
$M_{\text{eff(Actual)}}$	111,59	T·m
$M_{\text{eff(+350 kg)}}$	113,07	T·m

4.5.2 Momento de diseño según AASHTO 2017

Se determinó el momento flector generado en un vano de 30 metros por el camión de fatiga de la AASHTO 2017, cuyas dimensiones se especifican en el punto 2.2.2, obteniéndose un momento de 139,36 T·m.

4.5.3 Tránsito medio diario anual de vehículos pesados

El tránsito medio diario anual de vehículos pesados fue determinado según se detalla en el punto 3.6.2, dichos cálculos se realizaron para los 5 años disponibles y sumando el número de vehículos pesados de ambas direcciones del tránsito para obtener un promedio diario, obteniéndose valores diarios poco mayores a 4000 en la mayoría de casos, optándose por usar un TMDA pesado de 5000 en cálculos posteriores.

A continuación, se presenta el TMDA pesado según año y dirección del tránsito en la estación de Curacaví.

Tabla 4.6 TMDA pesado obtenido del registro

Año	Dirección 12	Dirección 34	Total
2016	1976	2073	4049
2017	2113	2222	4335
2018	2075	2171	4246
2019	1995	2137	4132
2022	1929	1940	3869

4.5.4 Índice de acumulación de daño

Una vez determinados los momentos equivalentes generados por los buses, además del momento generado por el camión de diseño, se calculó el daño generado por los buses antes y después del aumento de peso, además del daño esperado durante la vida útil del puente según diseño, esto utilizando la Ecuación 2.5 y llegándose a los siguientes resultados.

Tabla 4.7 Daños calculados

Daño	Valor
$D_{\text{Actual (5 años)}}$	$3,05 \cdot 10^{12}$
$D_{+350 \text{ kg (5 años)}}$	$3,17 \cdot 10^{12}$
$D_{\text{Diseño (vida útil)}}$	$3,70 \cdot 10^{14}$

Para calcular el índice de acumulación de daño es necesario determinar primero el valor de T, que es el número esperado de pasadas de camiones durante toda la vida útil del puente (75 años) y que se calcula como sigue.

$$T = \text{TMDA}_{\text{pesado}} \cdot 365 \cdot 75 = 136875000 \quad (4.1)$$

Luego se calcula el índice de acumulación de daño según la Ecuación 2.6 para el caso actual y el caso posterior al aumento de peso, además, como se tiene el daño generado por los buses en 5

años, se compara el índice de acumulación con la vida útil consumida según diseño en esos 5 años, calculada como 5 años sobre los 75 años de vida útil del puente.

En la siguiente Tabla se entregan los índices de acumulación de daño calculados.

Tabla 4.8 Índices de acumulación de daño

Índice	Valor
α_{Actual}	0,0082
$\alpha_{+350 \text{ kg}}$	0,0086

Luego, al dividir a por 5/75 y multiplicar por 100, se obtiene el porcentaje de vida útil del puente que consumen los buses interurbanos y como este cambia debido al aumento de peso.

$$\frac{\alpha_{\text{Actual}}}{5/75} = 12,3\% \quad (4.2)$$

$$\frac{\alpha_{+350 \text{ kg}}}{5/75} = 12,8\% \quad (4.3)$$

Observándose que el aumento de 350 kilogramos al peso del eje frontal genera un incremento de aproximadamente un 0,5% del porcentaje de vida útil del puente consumido por los buses interurbanos.

4.5.5 Disminución de la vida útil

La diferencia en los índices de acumulación de daño puede transformarse en un número adicional de pasadas de buses con el peso actual, esto se logra tomando a como la diferencia entre índices y despejando el número total de ciclos de carga generados por los buses (N) en la Ecuación 2.6.

$$(\alpha_{+350 \text{ kg}} - \alpha_{\text{Actual}}) \cdot \frac{D_{\text{Diseño (vida útil)}}}{M_{\text{eff(Actual)}}^m} = 88444 \quad (4.4)$$

Lo que significa que el aumentar el peso de los buses en 350 kilogramos a lo largo de 5 años equivale a que circulen 88444 buses adicionales, con el peso actual, en el periodo de 5 años. Lo

que implica que durante toda la vida útil del puente van a circular aproximadamente 1326661 buses que no estaban considerados en la fase de diseño, lo que sumarían 48 buses aproximadamente al tráfico sobre el puente.

El número adicional de buses se comparó con el número total de pasadas de camiones durante la vida útil esperadas durante el diseño del puente (T), esto a fin de determinar en qué porcentaje se reduce la vida útil del puente de estudio.

$$\frac{1326661}{T} \cdot 100 = 0,97\% \quad (4.5)$$

Lo que significa que la vida útil del puente se reduce un 0,97% producto del aumento de peso del eje frontal, es decir que, el puente de estudio perdería aproximadamente 9 meses de vida útil, lo que se considera un valor mínimo en comparación a los 75 años que tenía originalmente.

4.6 Deterioro considerando aumento del tráfico

Se realizó un análisis de deterioro considerando la tasa de aumento anual del tráfico de acuerdo a lo mencionado en el punto 3.6.4, por lo que se determinó la tasa de aumento según los datos de tráfico pesado disponibles en la Dirección General de Concesiones (MOP, 2018) para la ruta 68 entre los años 2014 y 2017:

Tabla 4.9 Tráfico pesado ruta 68

Año	Tráfico pesado	Tipo de vehículo
2014	4.740.917	Camiones y buses
2015	4.848.126	Camiones y buses
2016	5.030.729	Camiones y buses
2017	5.317.890	Camiones y buses

Fuente: Dirección General de Concesiones. MOP. (2018)

De donde se desprende que la tasa de aumento promedio anual del tráfico pesado para los años evaluados es del 3,9%.

4.6.1 Comparaciones índices de acumulación

Primero se calcula el daño esperado según el camión de fatiga de la AASHTO considerando el TMDA pesado constante de 5000 vehículos pesados diarios para los primeros 5 años, según se muestra en la tabla 4.10:

Tabla 4.10 Daño esperado en 5 años

Daño esperado	Valor
$D_{\text{Diseño (5 años)}}$	$2,47 \cdot 10^{13}$

Luego se realiza la comparación de los daños reales con el daño esperado mediante los índices de acumulación daño:

Tabla 4.11 Índices de acumulación en 5 años

Índice	Valor
α_{Actual}	0,1234
$\alpha_{+350 \text{ kg}}$	0,1284

Posteriormente la diferencia entre los índices de acumulación de daño se transforma en un número adicional de buses, análogo a lo realizado en el punto 4.5.5, para lo que se utiliza el número total de pasadas de camiones esperadas durante la vida útil del puente, ahora considerando la tasa de aumento anual de 3,9% desde los 5 años.

$$T = (5000 \cdot 5 \cdot 365) + \sum_{i=1}^{70} 5000 \cdot 365 \cdot (1 + 0,039)^i = 668291406 \tag{4.6}$$

Una vez determinado el número total de pasadas esperado en los 75 años, se despeja N de la Ecuación 2.6 y se obtiene el número adicional de buses equivalente.

$$\frac{\Delta\alpha \cdot T \cdot D_{\text{Camión Diseño a Fatiga}}}{M_{\text{eff(Actual)}}^m} = 6477414 \tag{4.7}$$

Lo que significa que aumentar el peso del eje frontal de todos los buses interurbanos en 350 kilogramos de ahora en adelante, considerando la tasa de aumento del tráfico, equivale a 6477414 pasadas de buses adicionales en los 75 años de vida útil del puente, siendo estos vehículos pesados que no estaban considerados durante la fase de diseño y que equivalen a aproximadamente 237 pasadas adicionales por día.

Finalmente, los buses adicionales se comparan con los vehículos pesados considerados inicialmente en el diseño (T) para determinar en qué porcentaje aumenta dicho valor producto del peso adicional.

$$\frac{6477414}{T} \cdot 100 = 0,97\% \quad (4.8)$$

Donde se observa que el tránsito de vehículos pesados aumenta en un 0,97% producto del peso adicional, lo que implica una reducción de 0,97% en la vida útil del puente hipotético, siendo estos resultados muy similares a los obtenidos en la evaluación sin considerar la tasa de aumento del tráfico pesado.

4.7 Conclusiones

Se calcularon los efectos a momento, corte y deterioro por fatiga en puentes simplemente apoyados producto de aumentar en 350 kilogramos el peso del eje frontal de buses interurbanos, esto aprovechando los datos del peso de buses interurbanos reales obtenidos de estaciones de pesaje y concluyéndose que dicho aumento no es significativo ni en términos de aumento porcentual de la demanda respecto del caso actual, ni de las demandas a corte y momento generadas por los buses con el peso adicional en comparación a las esperadas según patrones de cargas o del deterioro adicional evaluado en el puente de estudio producto del aumento de peso, las conclusiones que se pueden extraer de los resultados obtenidos serán exploradas en mayor profundidad en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En el estudio se trabajó con datos de más de 2 millones de buses reales con eje simple frontal pesados en la estación de Curacaví en los 2016 al 2019 y el 2022. Utilizando dicha base de datos se determinaron los principales efectos generados por cargas vivas sobre los puentes, siendo estos la fuerza cortante, el momento flector y el deterioro por fatiga. Adicionalmente se determinó el incremento que genera en dichos efectos el aumentar el peso del eje frontal en 350 kilogramos y como dicha demanda se compara con los efectos esperados según diseño en los patrones de cargas HS20-44+20% del Manual de Carreteras y HL-93 de la AASHTO LRFD, al respecto se pueden obtener varias conclusiones que se resumen a continuación:

- En los cinco años de registros de Curacaví se encontraron 2194069 buses interurbanos que se clasifican como tráfico pesado y potencialmente dañino para los puentes, representando esto un 32,2% de los vehículos pesados de la estación. Además, se encontró que los buses de dos ejes son mucho más frecuentes que los buses de tres ejes, siendo un 64% de los buses con eje simple frontal aproximadamente.
- El aumento de la demanda a momentos flectores y fuerzas cortante producto del peso adicional es en promedio de un 2% respecto del escenario actual, con las mayores variaciones observándose en los buses más livianos, sin que este aumento porcentual supere el 10% respecto de la demanda actual en ningún caso.
- Las demandas a momento flector y fuerza cortante generadas por los buses del registro con el peso adicional quedan en general dentro de las demandas esperadas para cargas vivas según los patrones de cargas utilizados en el diseño de puentes en Chile, cumpliéndose dicho requisito con holgura en la mayoría de casos.
- La reducción de vida útil debido a la fatiga adicional generada por el aumento de peso determinada en el puente de estudio es aproximadamente de 9 meses respecto de la vida original de 75 años.

Considerando lo anterior, se puede concluir que aumentar el peso del eje frontal de los buses interurbanos en 350 kilogramos no produce efectos significativos respecto de aumentos de la demanda a fuerza cortante y momento flector, ni respecto de la reducción de vida útil del puente, por lo que desde el punto de vista estructural de los puentes y considerando los motivos del aumento de peso, este estudio recomienda aumentar el límite normativo actual.

REFERENCIAS

- AASHTO. (2002). *Standard Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway Transportation Officials.
- AASHTO. (2012). *LRFD Bridge Design Specifications* (6th ed.). American Association of State Highway Transportation Officials.
- AASHTO. (2017). *LRFD Bridge Design Specifications* (8th ed.). American Association of State Highway Transportation Officials.
- Ramesh Babu, A. M. (2019). Quantifying the Fatigue Damage Accumulation in Bridges.
- Babu, A. R., Iatsko, O., & Nowak, A. S. (2019). Comparison of bridge live loads in US and Europe. *Structural Engineering International*, 29(1), 84-93.
<https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1541334>
- Basquin, O. H. (1910). The exponential law of endurance tests. In *Proceedings of American Society for Testing and Materials* (Vol. 10, pp. 625-630).
- Catalán, B. (2023). Estudio de ingeniería y levantamiento de información “ Terminal de buses Collao, Concepción”.
- Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. (2022). *Plan de puentes 2020-2030*. MOP.
- Dirección General de Concesiones. Ministerio de Obras Públicas. (2018). Anexo Balance de Gestión Marzo 2014-Marzo 2018 (Excel). [Ministerio de obras públicas - Dirección General de Concesiones de Obras Públicas](#)
- Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue.
- Ministerio de Obras Públicas. (2023). *Manual de Carreteras*. MOP.

- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2019). Fiscalización del Transporte Interurbano. [Plan de Inversión en Red Aeroportuaria](#)
- Marchini, L. L. (2024). Análisis de las cargas vivas en puentes de la ruta 68 y su evolución en el tiempo entre el periodo 2009-2023.
- Nowak, A. S. (1993). Live load model for highway bridges. *Structural safety*, 13(1-2), 53-66.
- Nowak, A. S., Nassif, H., & DeFrain, L. (1993). Effect of truck load on bridges. *Journal of transportation engineering*. 119(6), 853-867. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1993\)119:6\(853\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1993)119:6(853)).
- Ortiz, J. P. (2024). Análisis de las cargas vivas en puentes carreteros chilenos desagregados según macrozona.
- Szerszen, M. M., Nowak, A. S., & Laman, J. A. (1999). Fatigue reliability of steel bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 52(1), 83-92. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00015-2).
- Ye, X. W., Su, Y. H., & Han, J.P. (2014). A state-of-the-art review on fatigue life assessment of steel bridges, *Mathematical problems in Engineering*, vol. 2014,1-13. <https://doi.org/10.1155/2014/956473>.

Anexos

ANEXO 1.1: Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10: Reducción de las desigualdades.
- ODS-11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12: Producción y consumo responsables.
- ODS-13: Acción por el clima.
- ODS-14: Vida Submarina.
- ODS-15: Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16: Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17: Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>En el trabajo se determinan los efectos de aumentar el límite normativo del peso de un eje simple frontal para buses interurbanos y el impacto que esto podría tener sobre los puentes que forman parte de la red caminera del país, el estudio está motivado por la fundamental importancia de los puentes en dicha red además de la gran relevancia de los buses interurbanos en el transporte de pasajeros a nivel nacional, se determinó que el aumento de peso genera cambios mínimos en términos de momentos flectores y fuerzas cortantes, manteniéndose estos dentro de lo esperado según los patrones de carga de diseño para la gran mayoría de buses, además se calculó la reducción de la vida útil de un puente tipo producto del peso adicional, obteniéndose un disminución de 9 meses respecto de los 75 años esperados originalmente, lo que se juzga también como un cambio menor, dicho esto y considerando que el aumento se debe a medidas de seguridad adicionales instaladas en los buses, se concluye que el aumento, al menos desde el punto de vista estructural de los puentes, está justificado.</p>

ANEXO 4.1: Gráficos distribución normal inversa acumulada

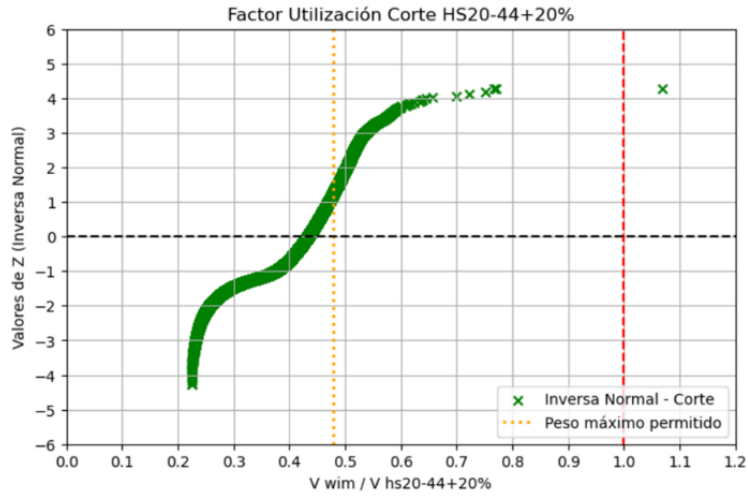


Figura A4.1.1 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 10m)

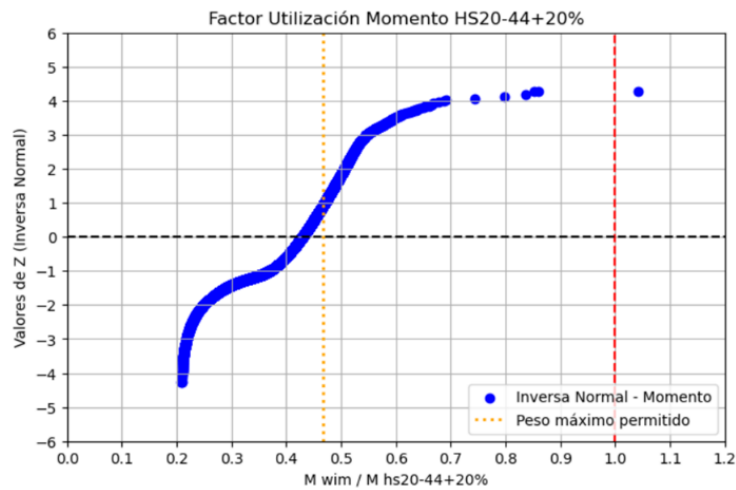


Figura A4.1.2 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 10m)

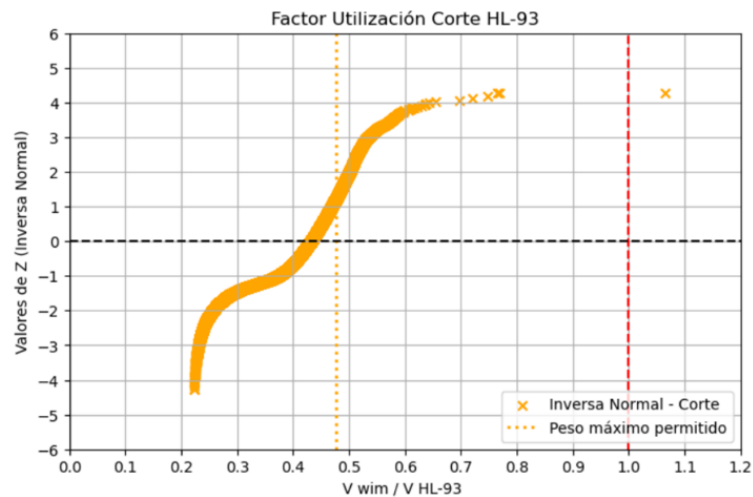


Figura A4.1.3 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 10m)

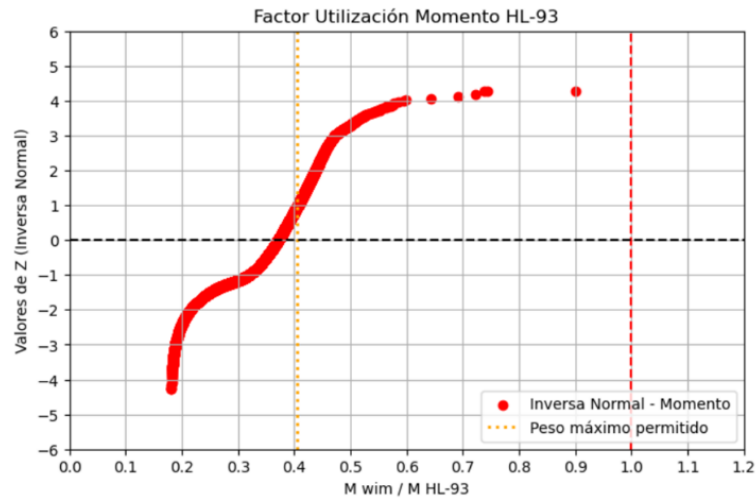


Figura A4.1.4 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 10m)

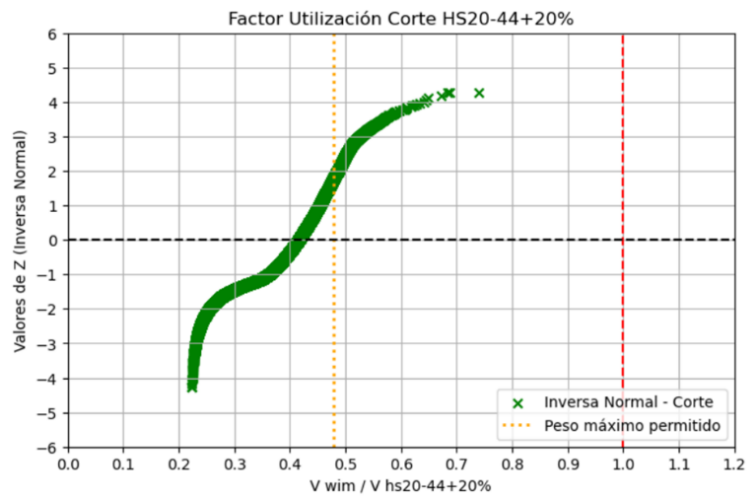


Figura A4.1.5 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 10m)

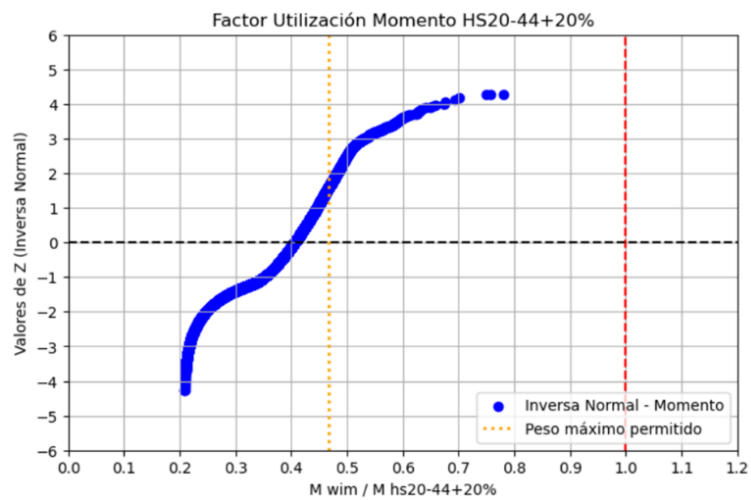


Figura A4.1.6 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 10m)

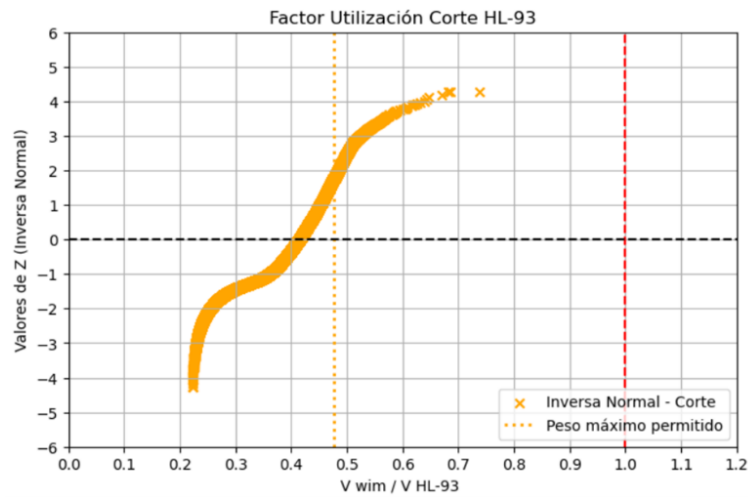


Figura A4.1.7 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 10m)

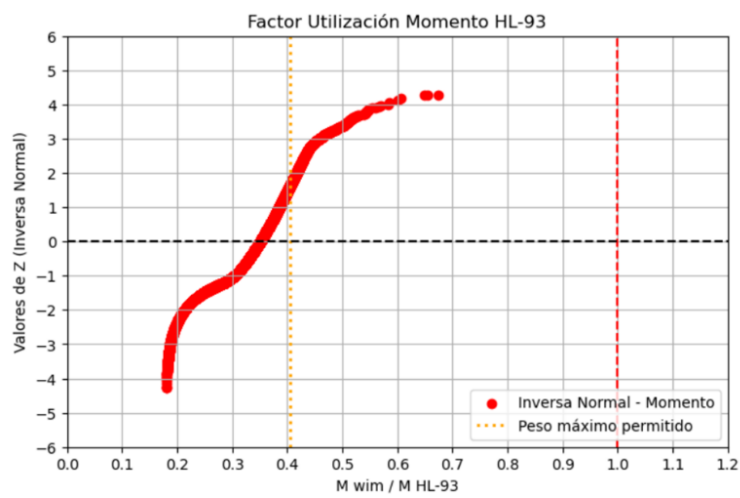


Figura A4.1.8 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 10m)

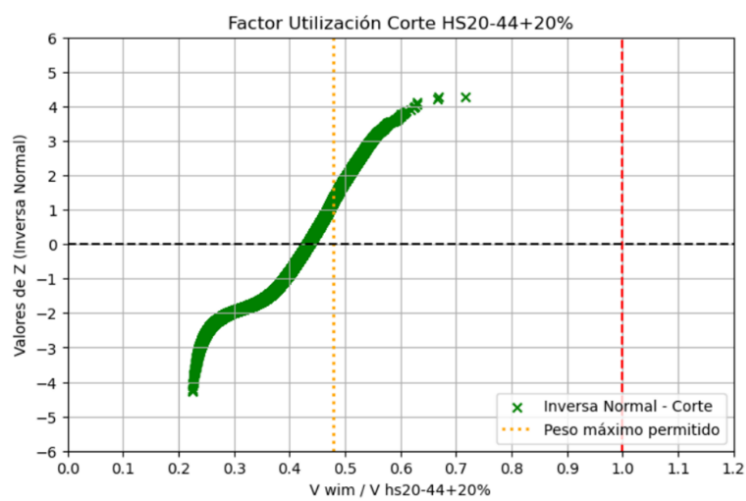


Figura A4.1.9 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 10m)

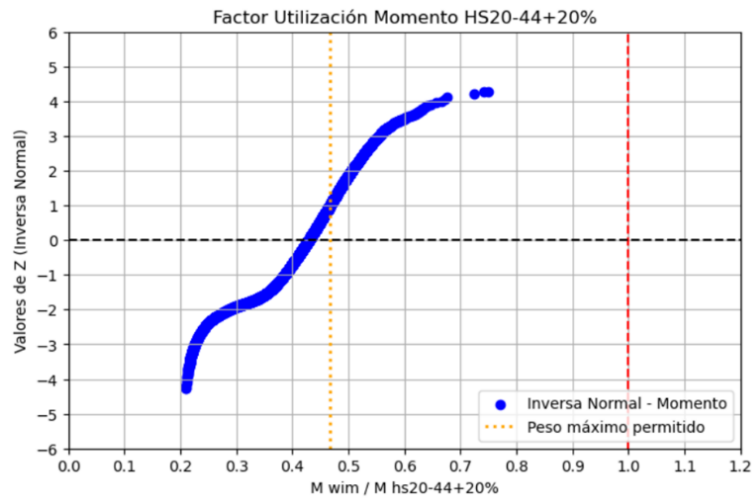


Figura A4.1.10 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 10m)

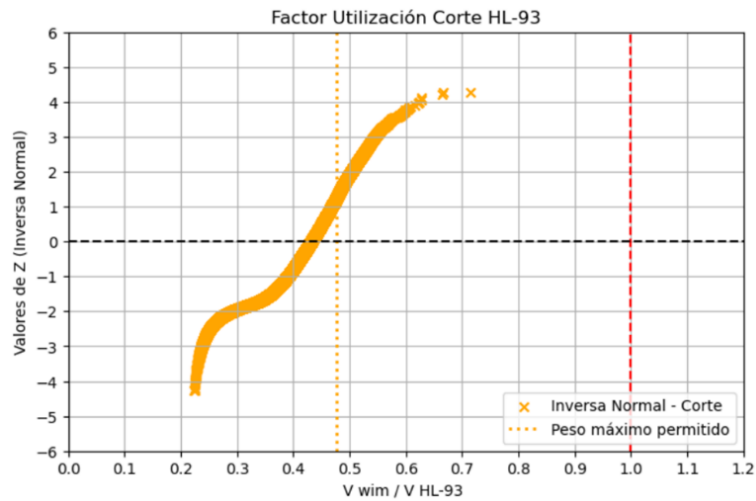


Figura A4.1.11 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 10m)

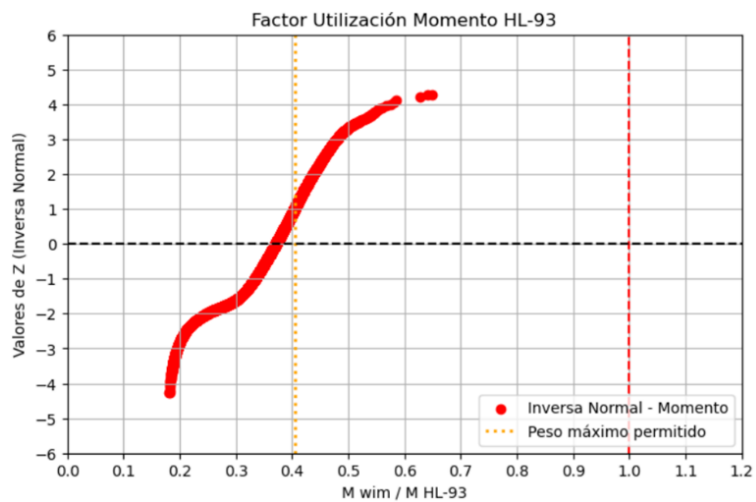


Figura A4.1.12 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 10m)

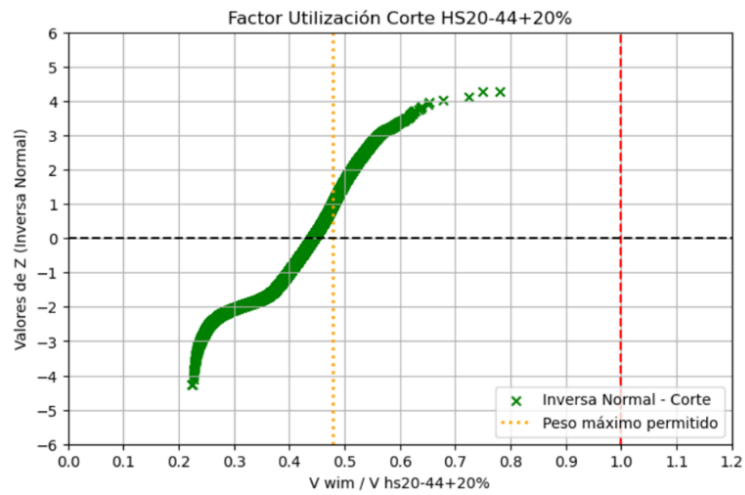


Figura A4.1.13 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 10m)

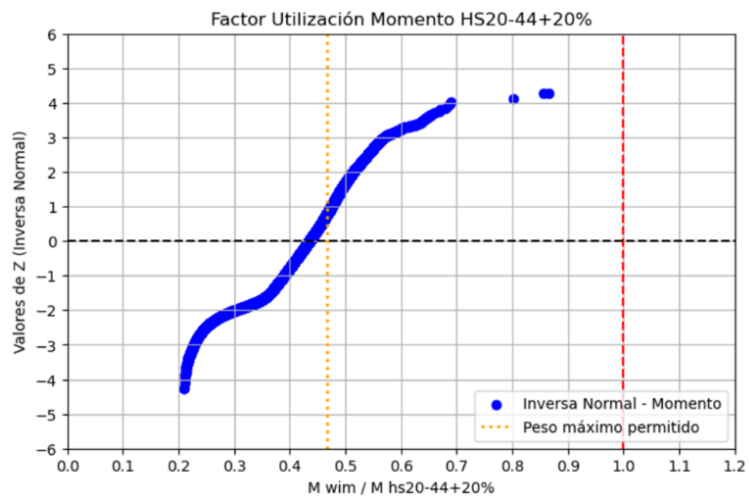


Figura A4.1.14 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 10m)

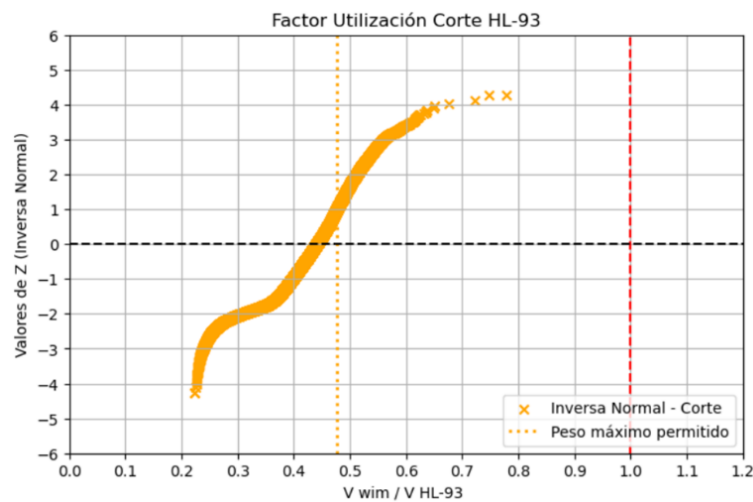


Figura A4.1.15 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 10m)

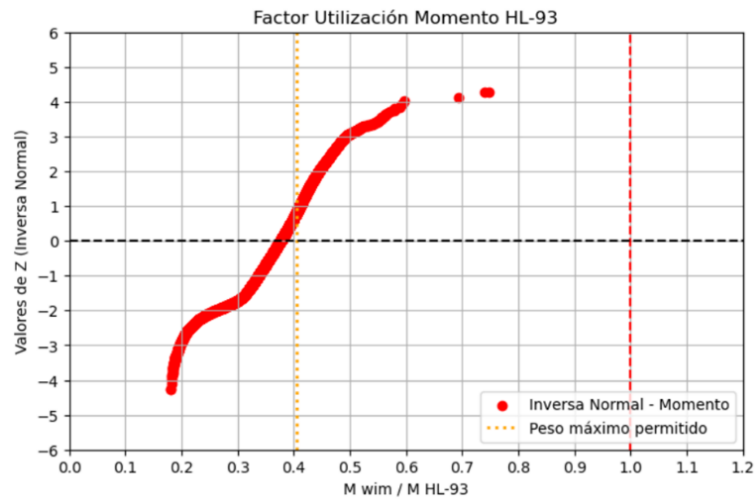


Figura A4.1.16 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 10m)

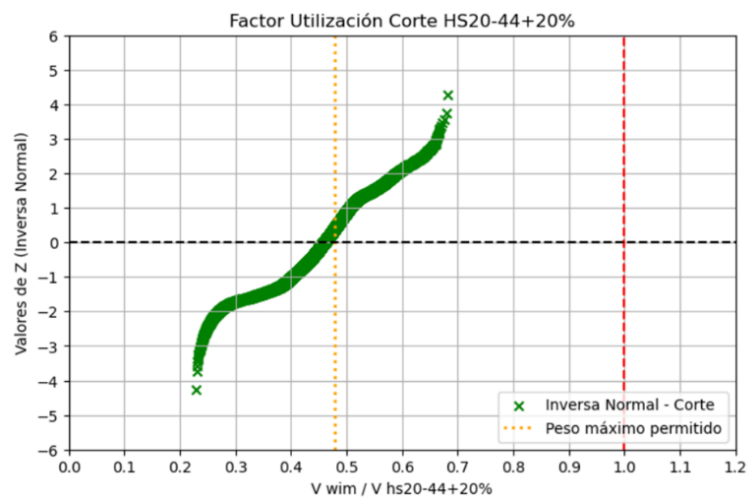


Figura A4.1.17 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 10m)

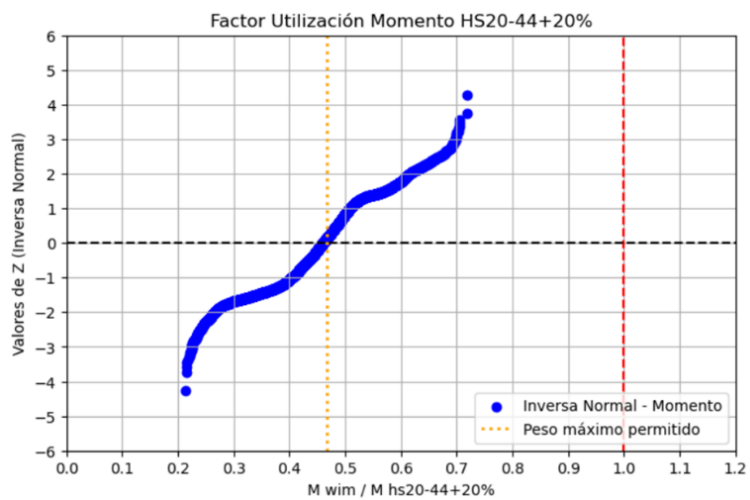


Figura A4.1.18 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 10m)

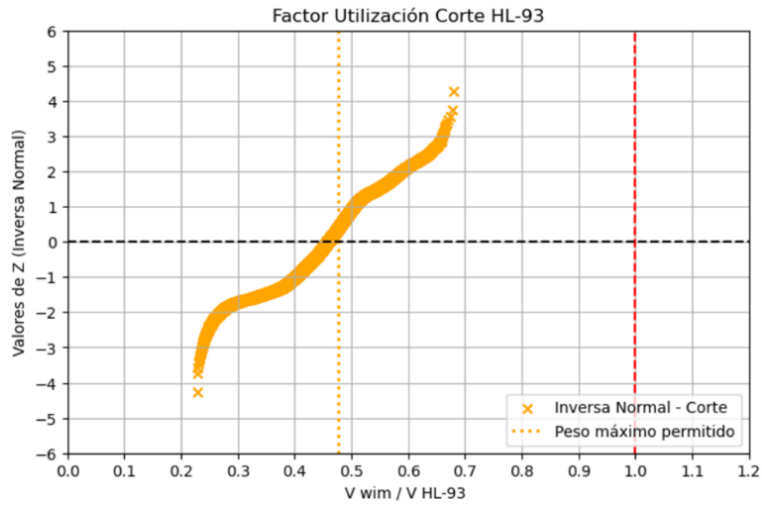


Figura A4.1.19 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 10m)

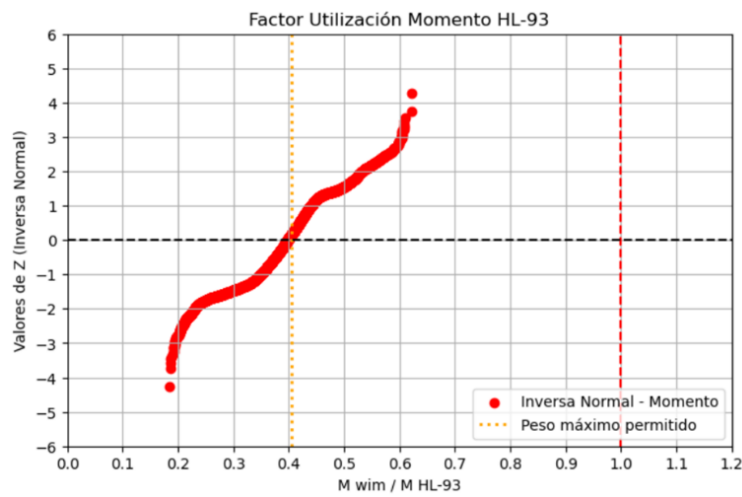


Figura A4.1.20 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 10m)

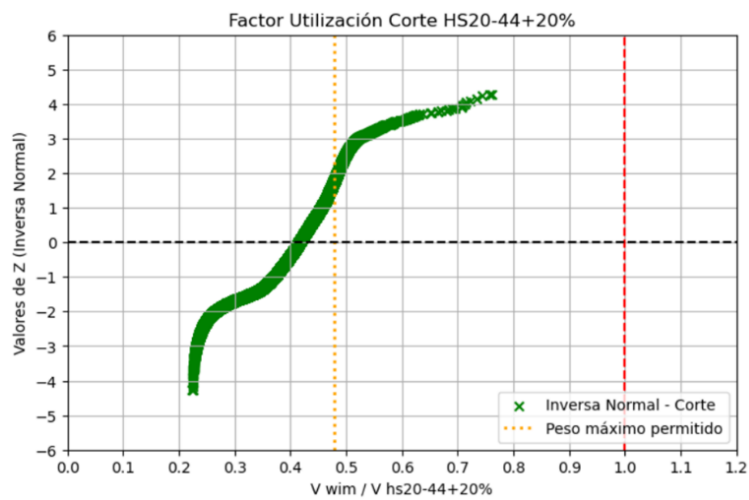


Figura A4.1.21 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 10m)

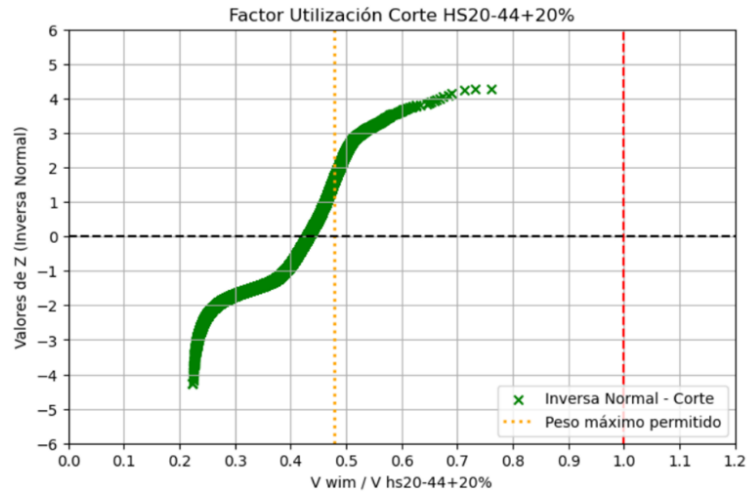


Figura A4.1.25 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 10m)

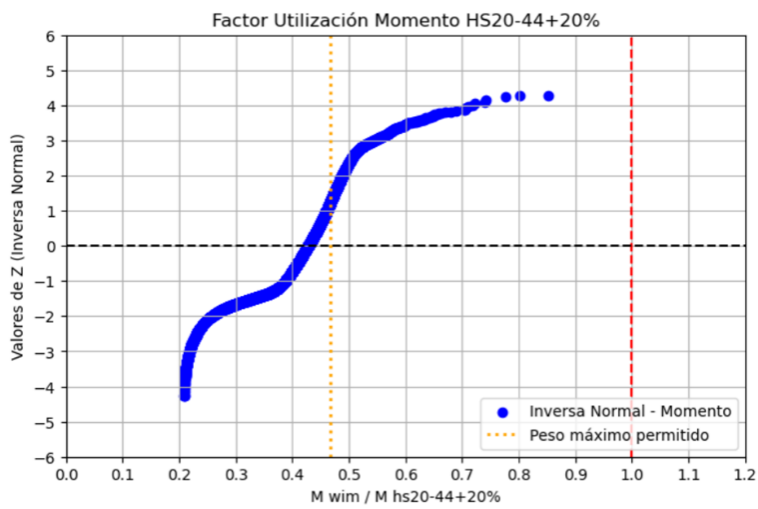


Figura A4.1.26 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 10m)

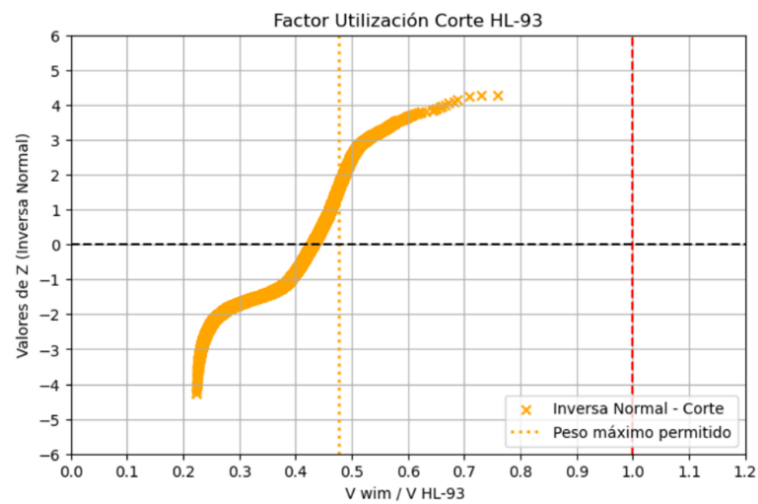


Figura A4.1.27 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 10m)

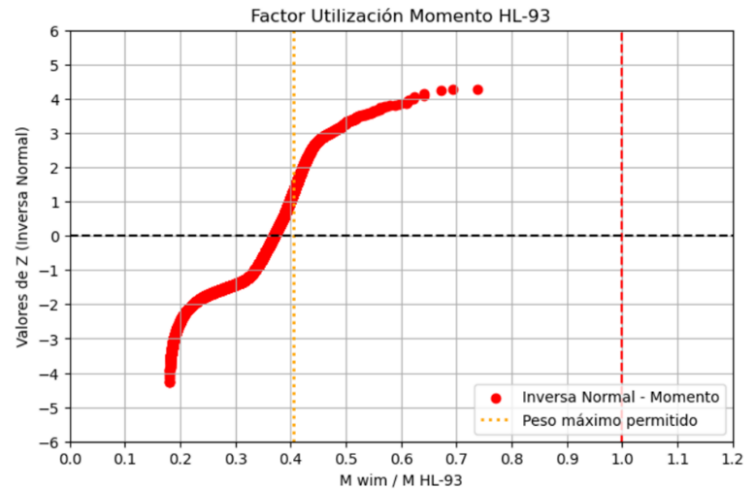


Figura A4.1.28 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 10m)

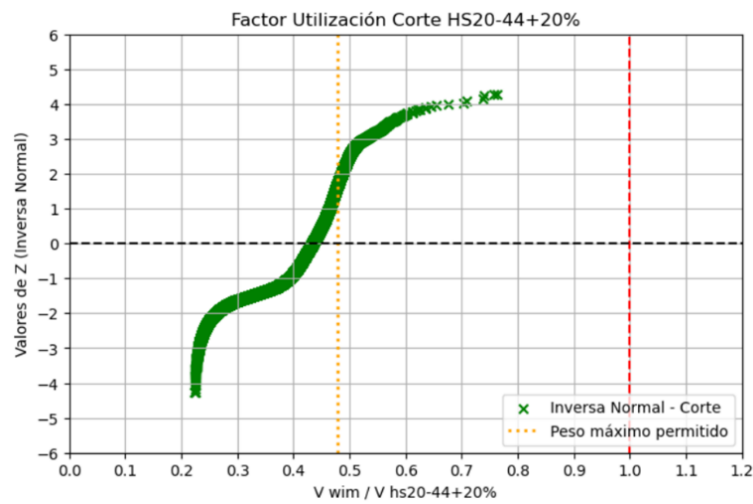


Figura A4.1.29 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 10m)

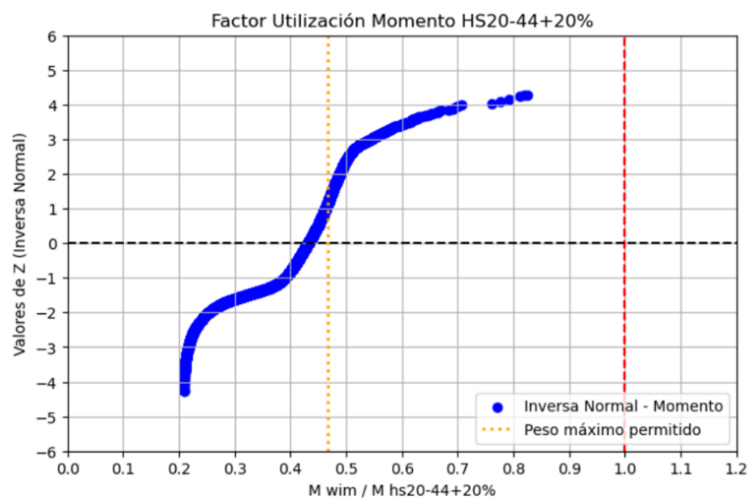


Figura A4.1.30 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 10m)

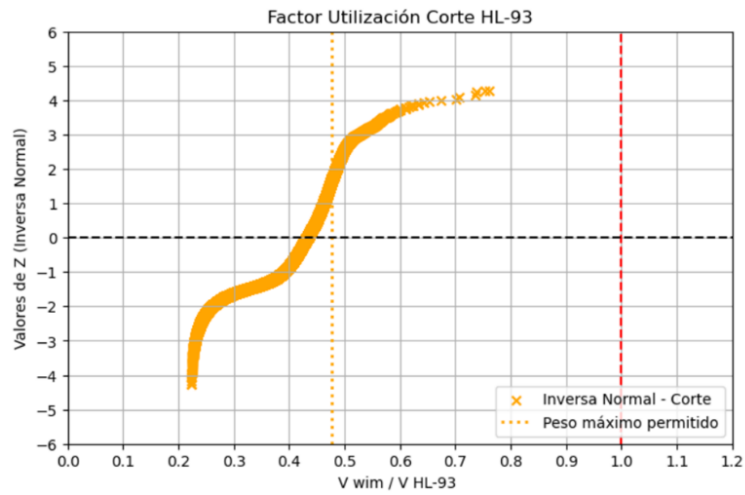


Figura A4.1.31 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 10m)

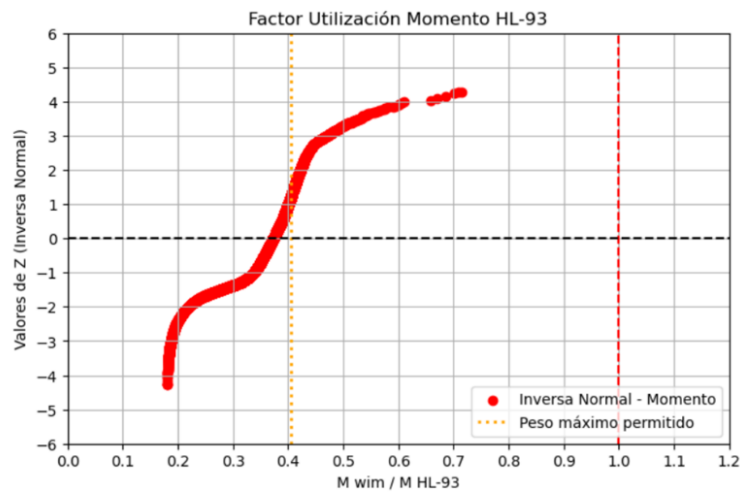


Figura A4.1.32 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 10m)

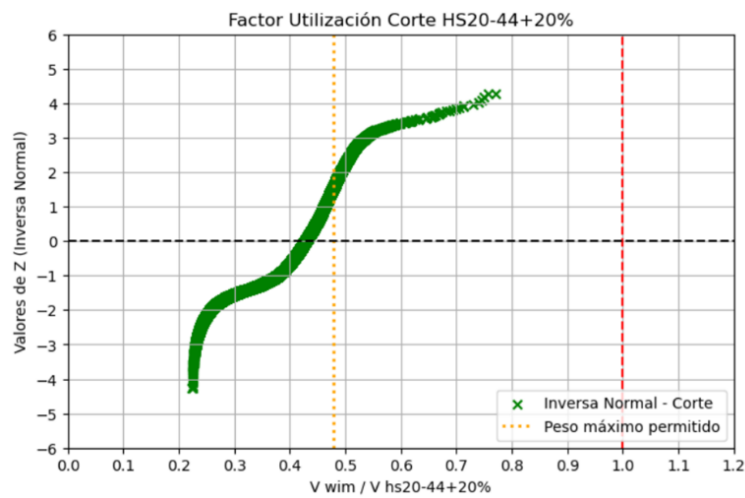


Figura A4.1.33 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 10m)

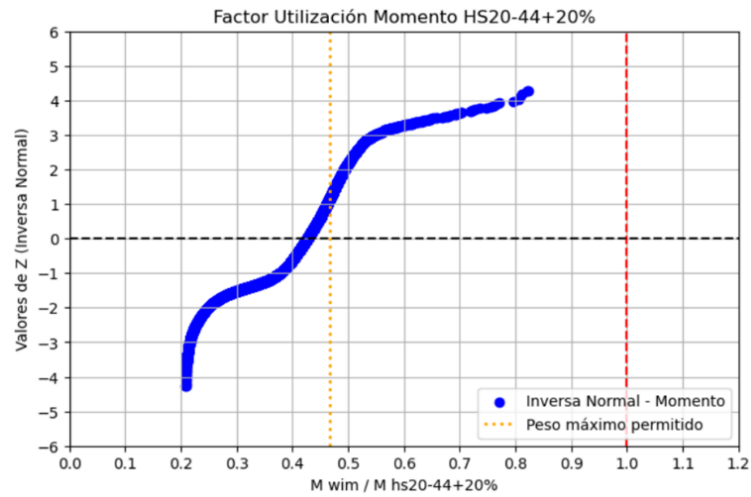


Figura A4.1.34 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 10m)

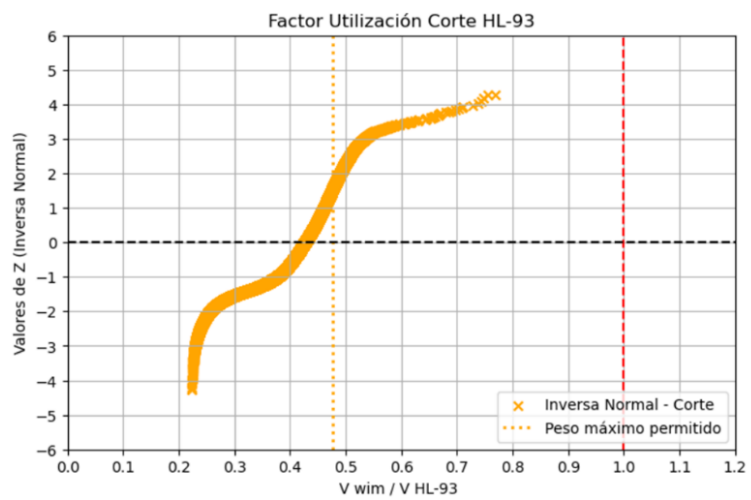


Figura A4.1.35 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 10m)

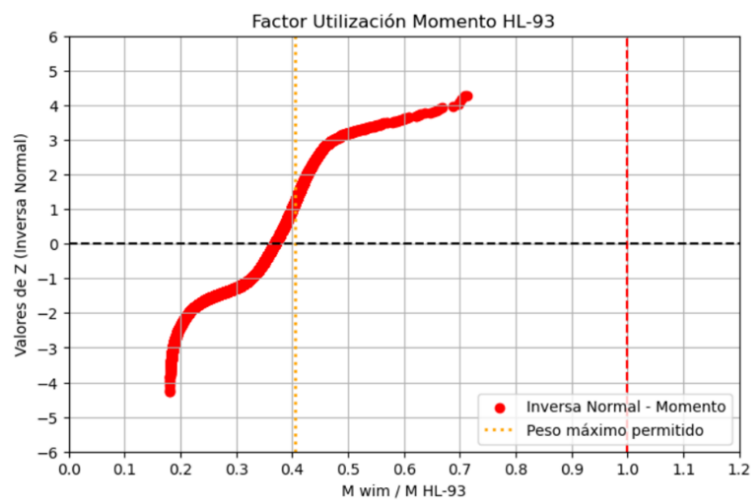


Figura A4.1.36 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 10m)

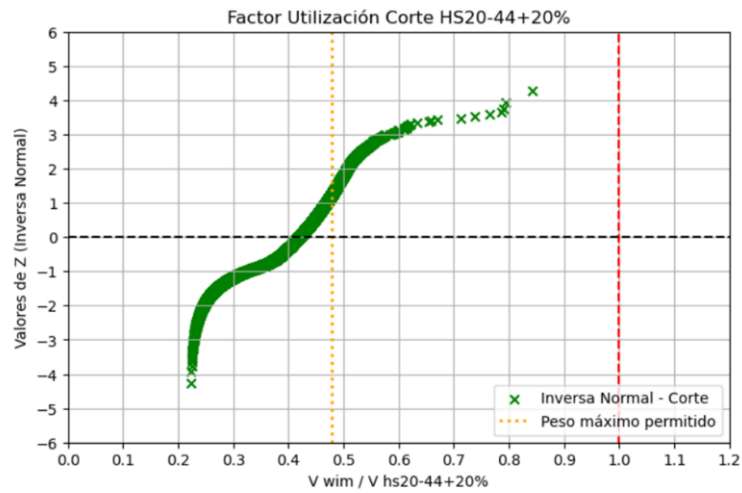


Figura A4.1.37 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 10m)

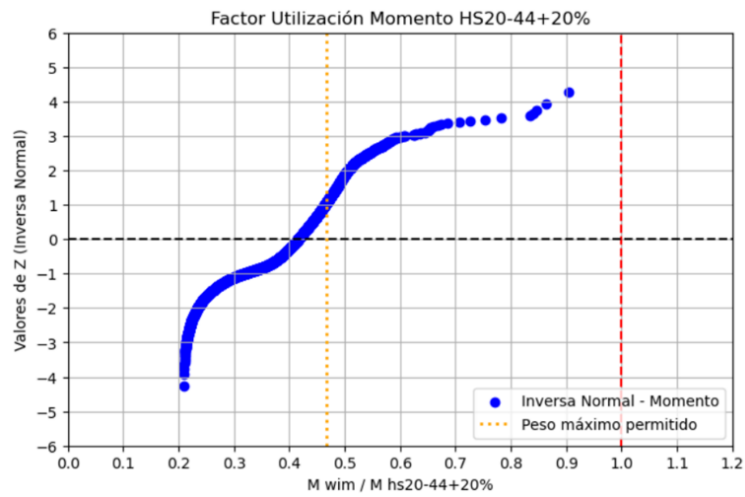


Figura A4.1.38 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 10m)

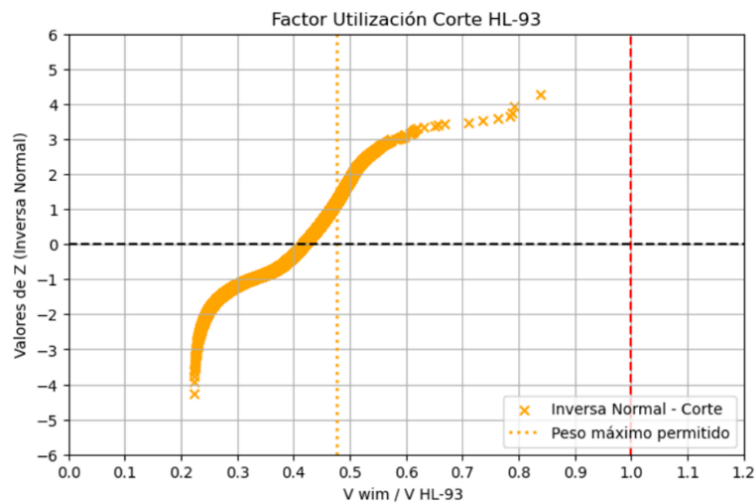


Figura A4.1.39 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 10m)

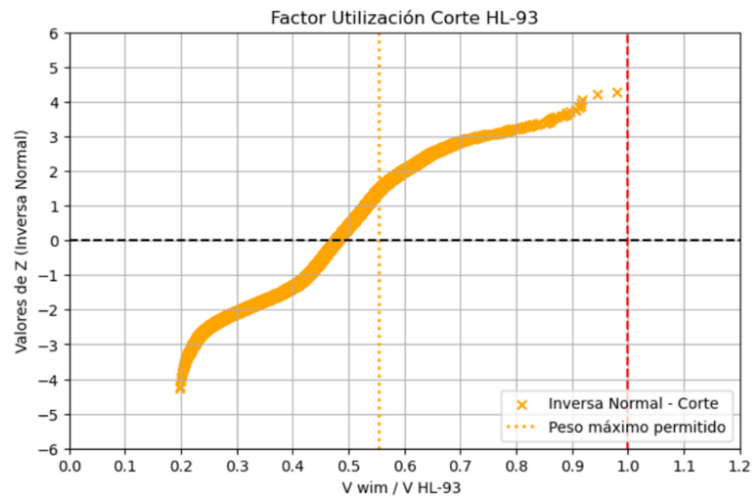


Figura A4.1.43 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 10m)

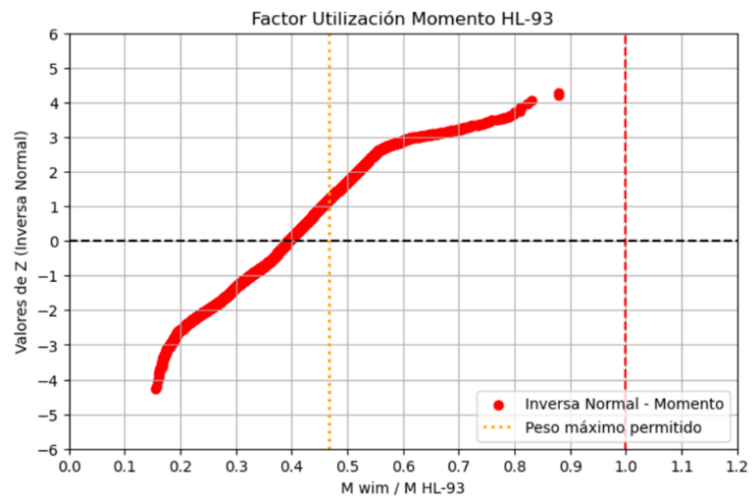


Figura A4.1.44 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 10m)

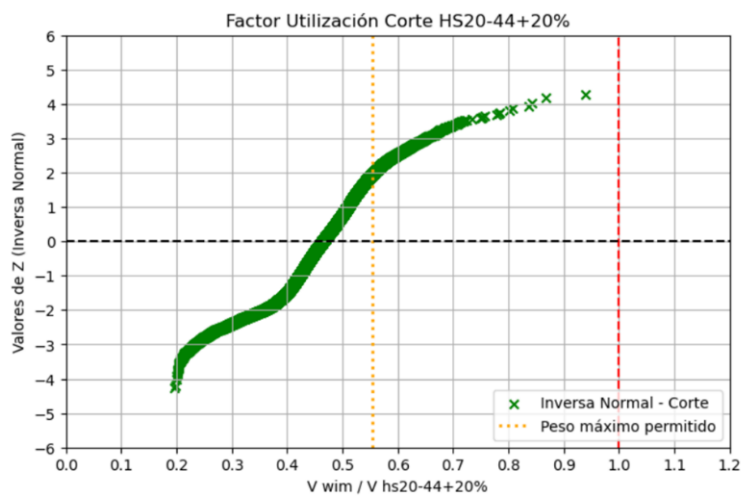


Figura A4.1.45 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 10m)

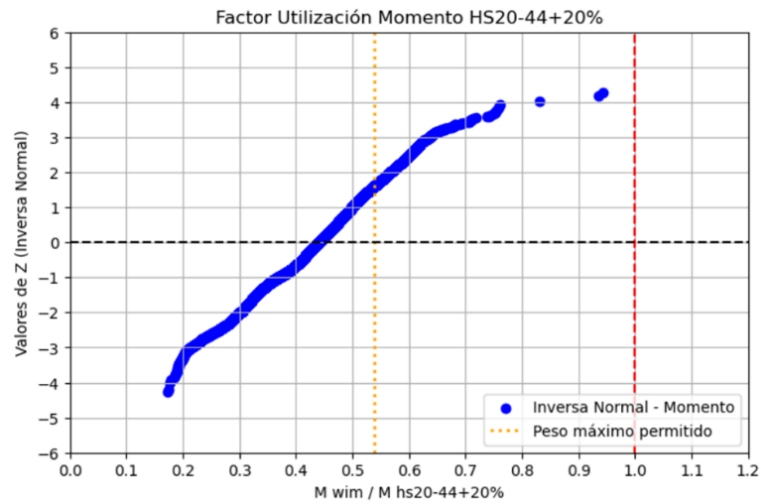


Figura A4.1.46 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 10m)

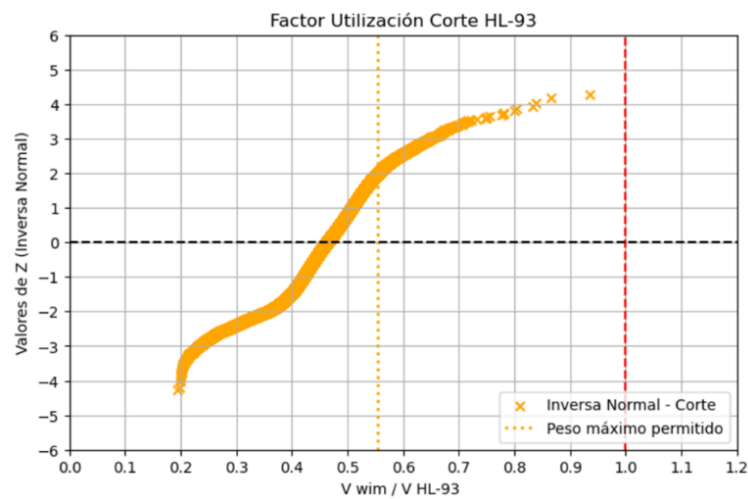


Figura A4.1.47 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 10m)

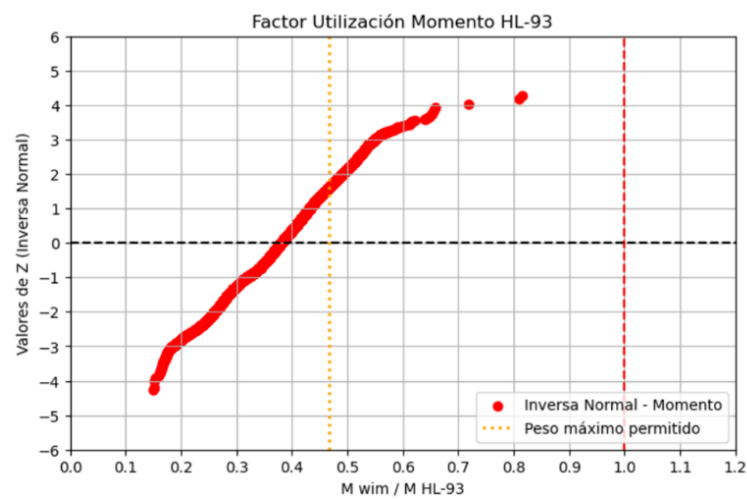


Figura A4.1.48 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 10m)

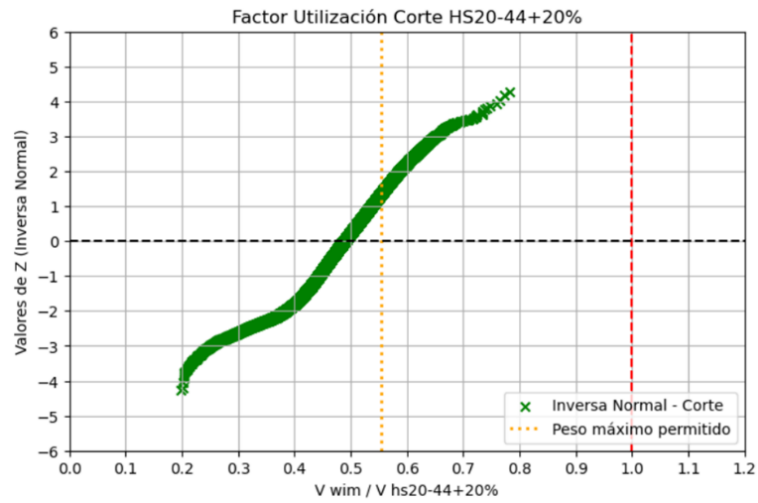


Figura A4.1.49 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 10m)

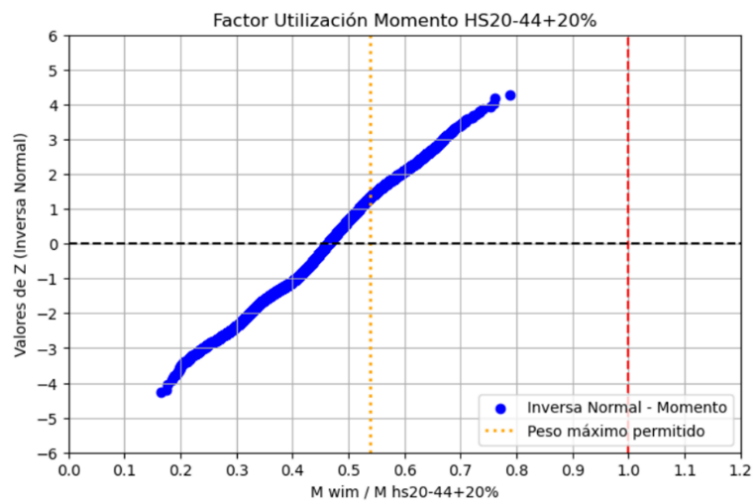


Figura A4.1.50 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 10m)

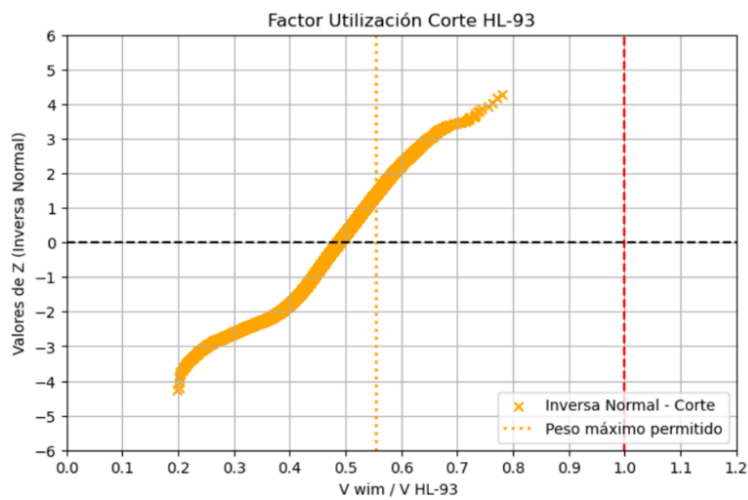


Figura A4.1.51 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 10m)

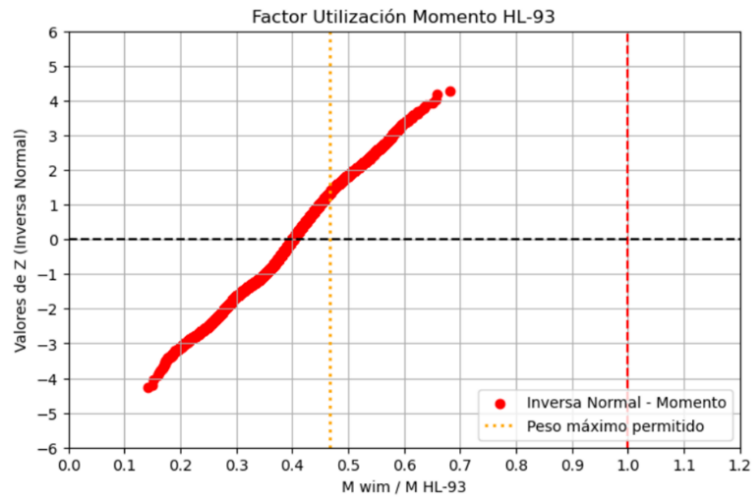


Figura A4.1.52 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 10m)

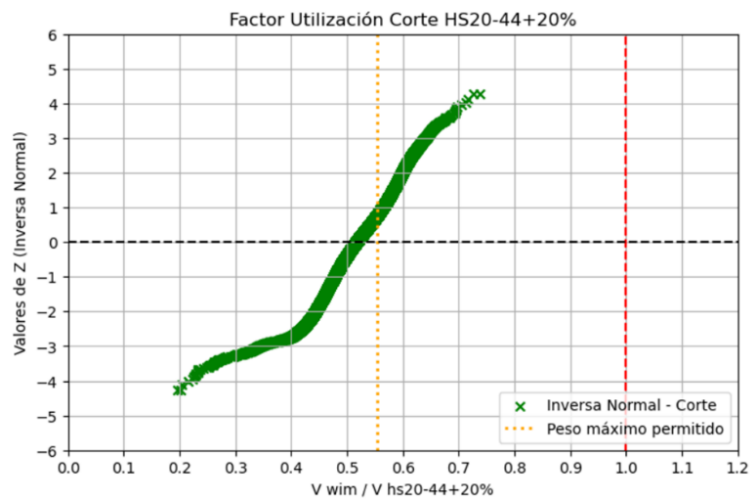


Figura A4.1.53 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 10m)

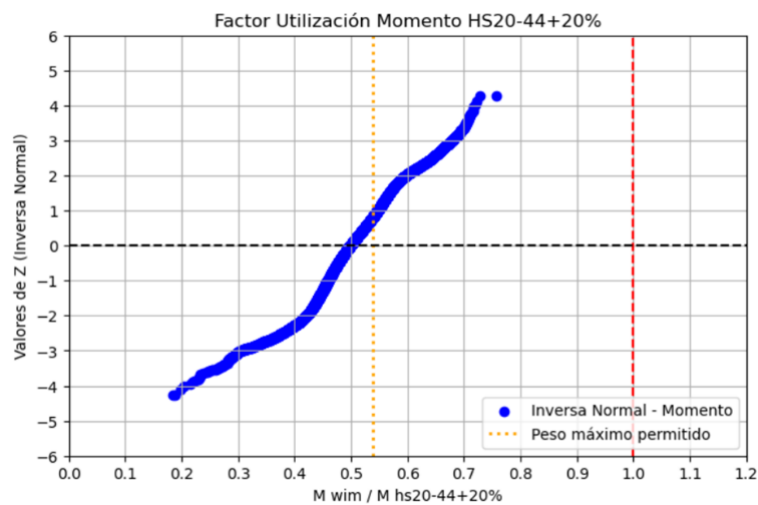


Figura A4.1.54 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 10m)

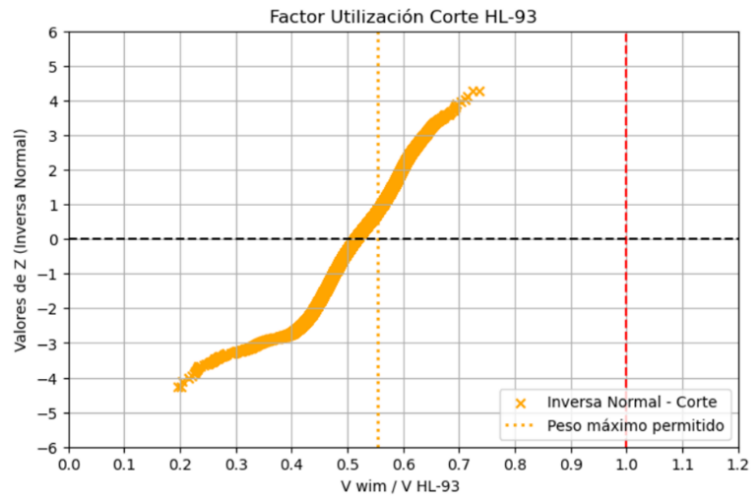


Figura A4.1.55 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 10m)

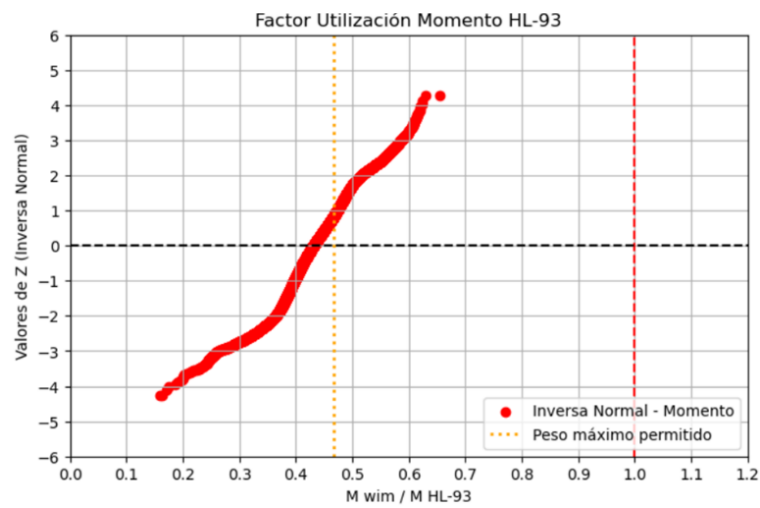


Figura A4.1.56 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 10m)

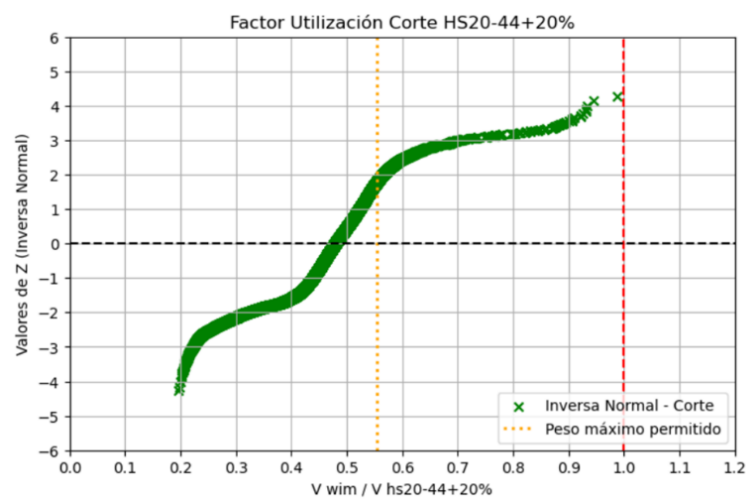


Figura A4.1.57 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 10m)

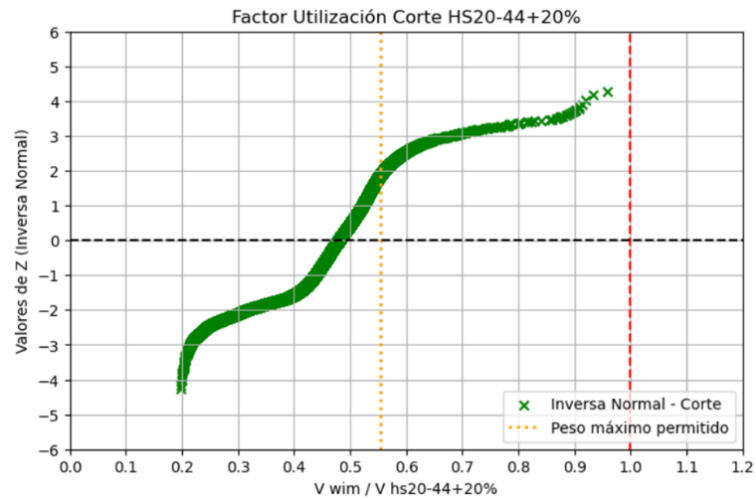


Figura A4.1.61 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 10m)

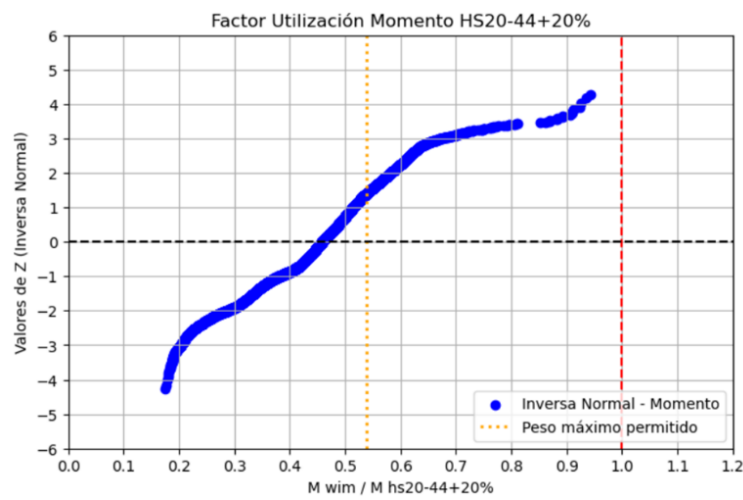


Figura A4.1.62 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 10m)

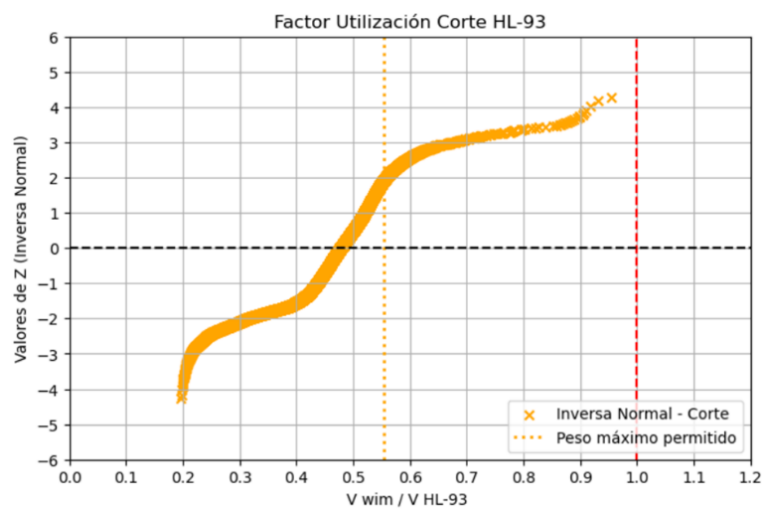


Figura A4.1.63 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 10m)

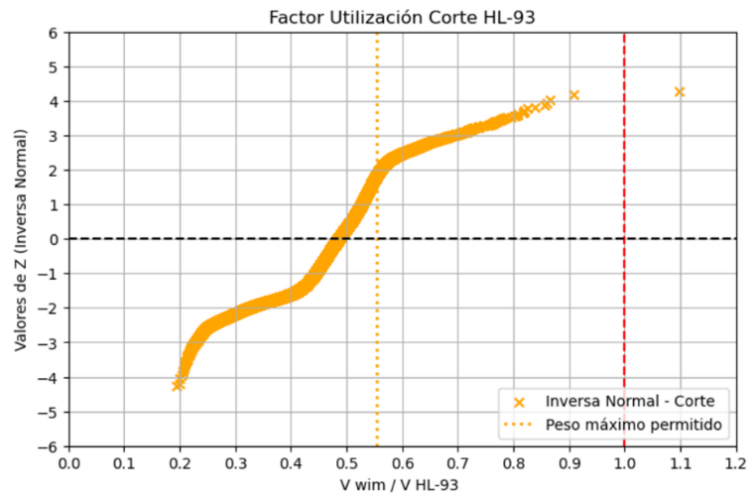


Figura A4.1.67 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 10m)

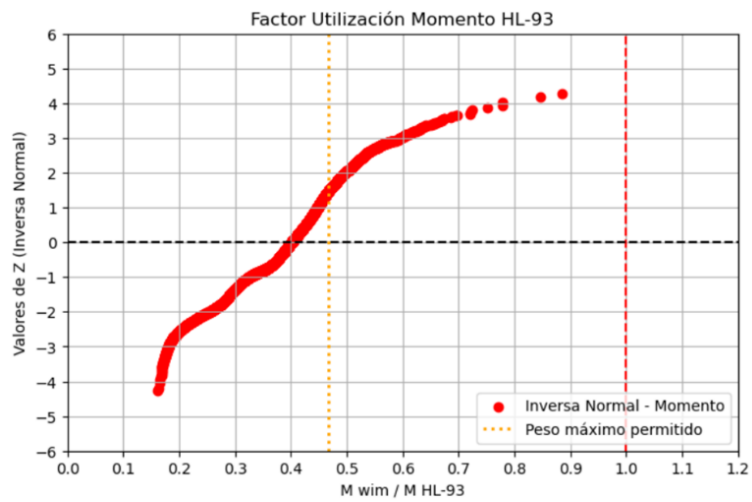


Figura A4.1.68 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 10m)

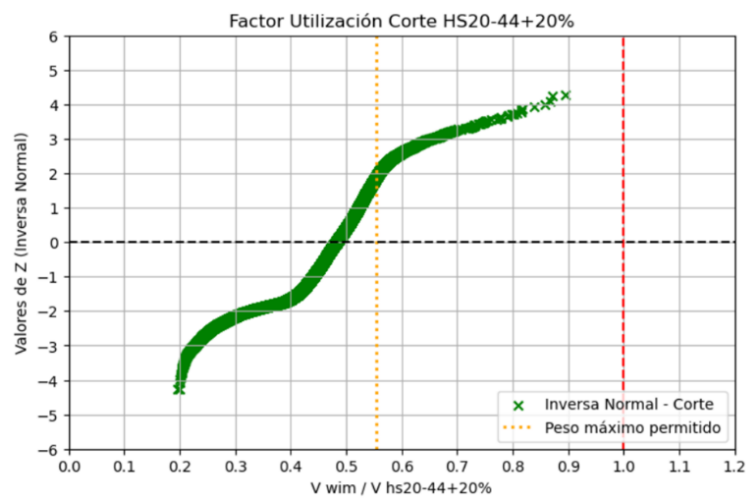


Figura A4.1.69 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 10m)

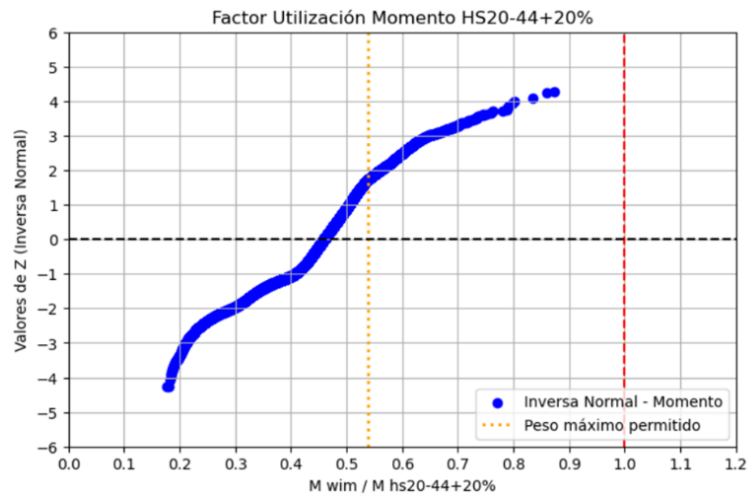


Figura A4.1.70 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 10m)

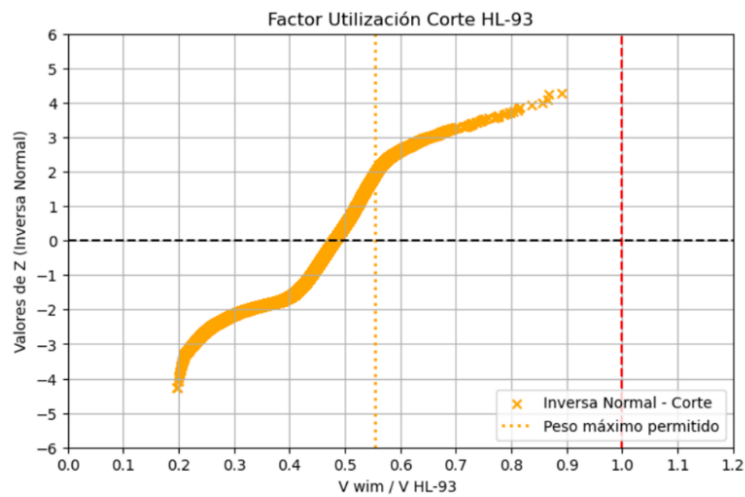


Figura A4.1.71 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 10m)

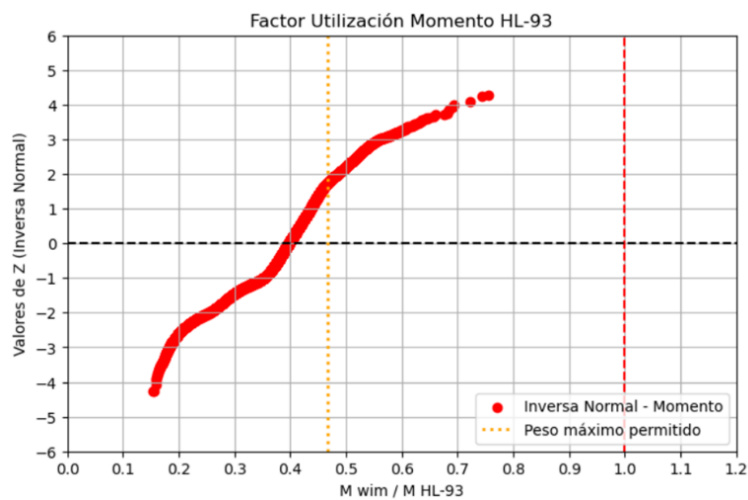


Figura A4.1.72 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 10m)

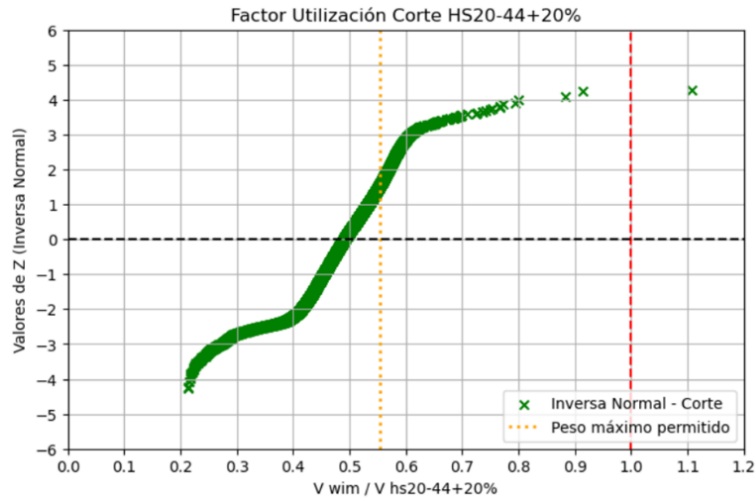


Figura A4.1.73 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 10m)

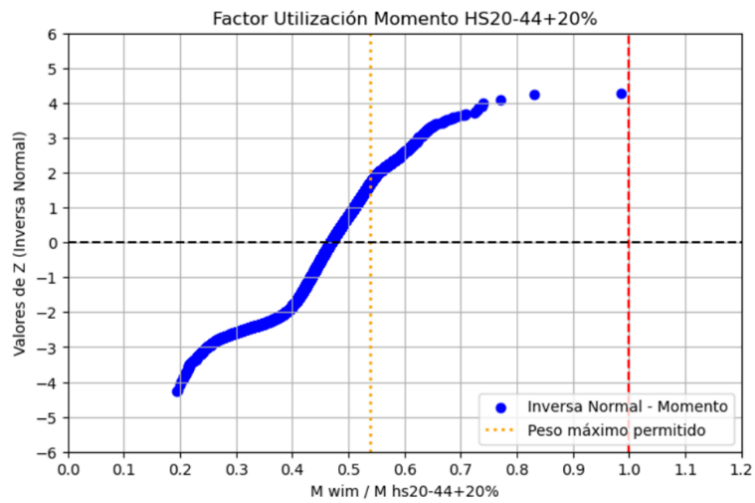


Figura A4.1.74 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 10m)

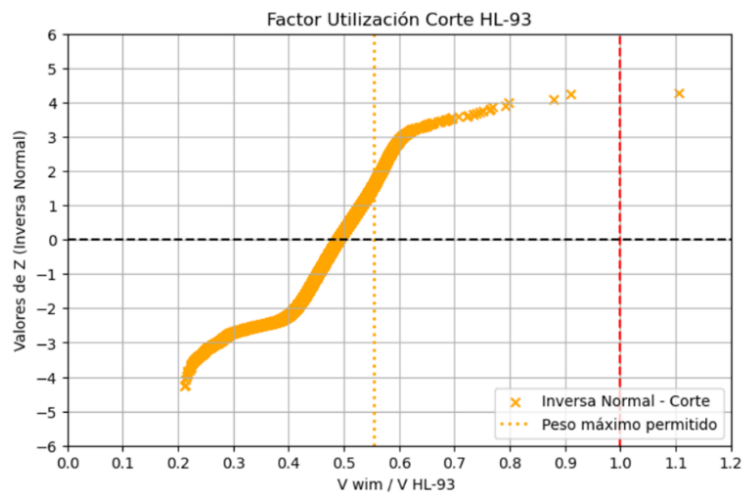


Figura A4.1.75 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 10m)

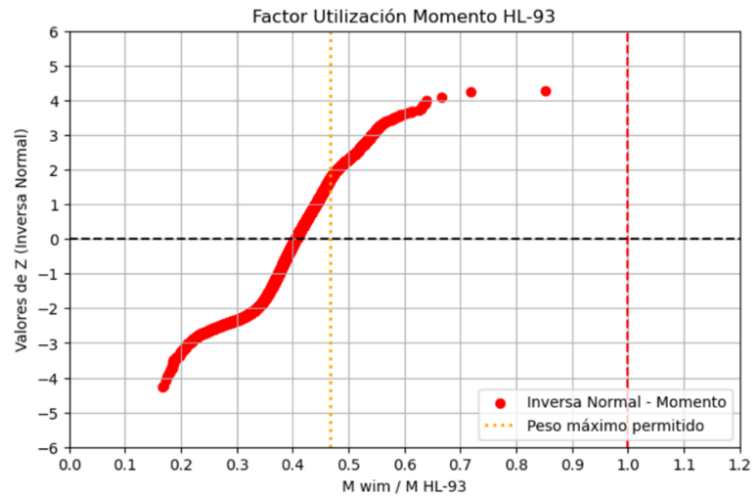


Figura A4.1.76 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 10m)

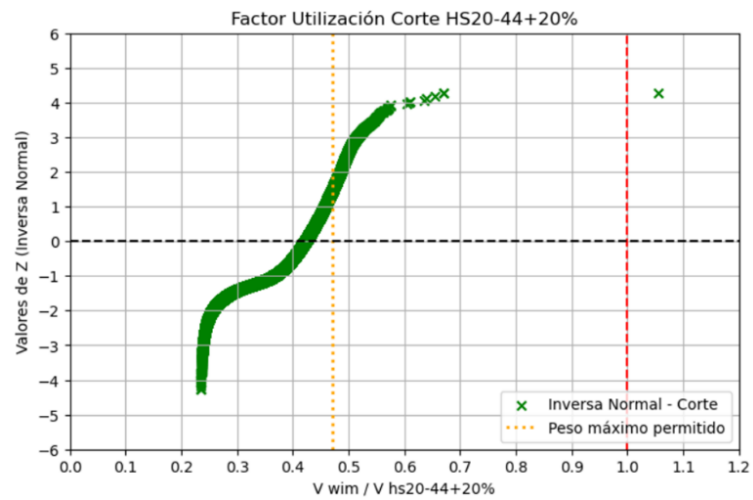


Figura A4.1.77 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 30m)

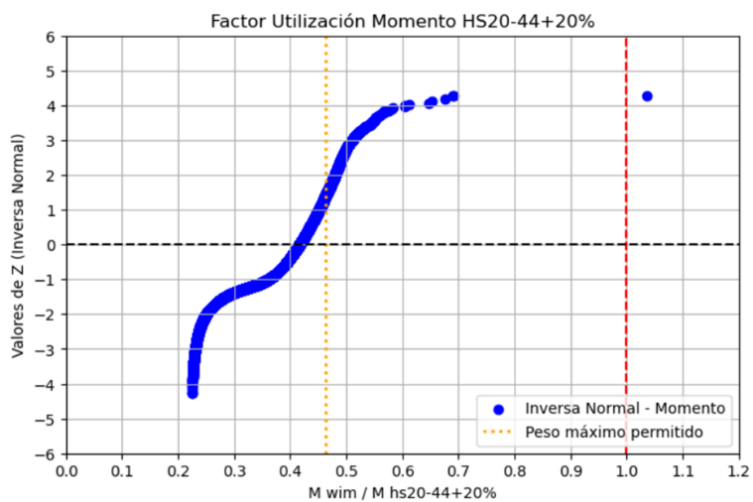


Figura A4.1.78 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 30m)

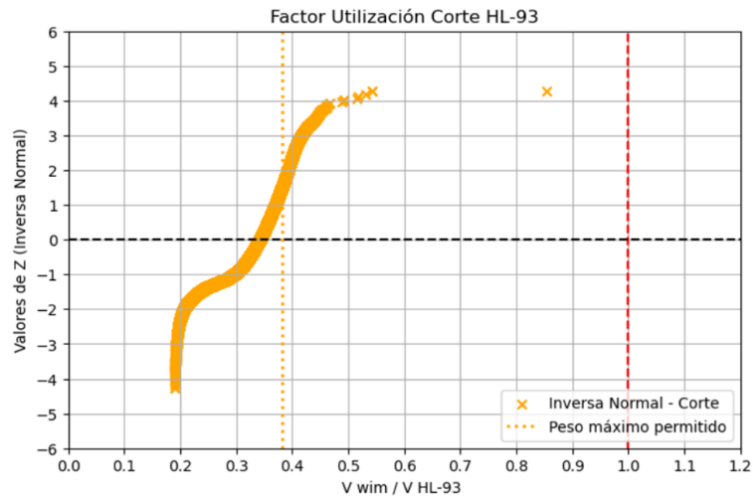


Figura A4.1.79 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 30m)

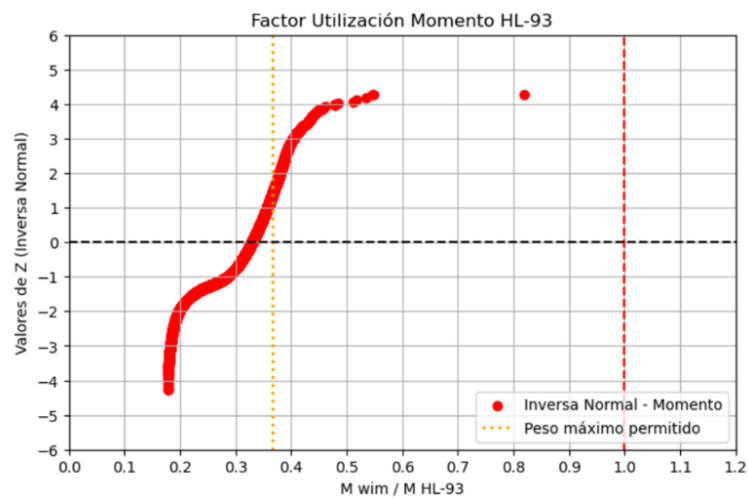


Figura A4.1.80 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 30m)

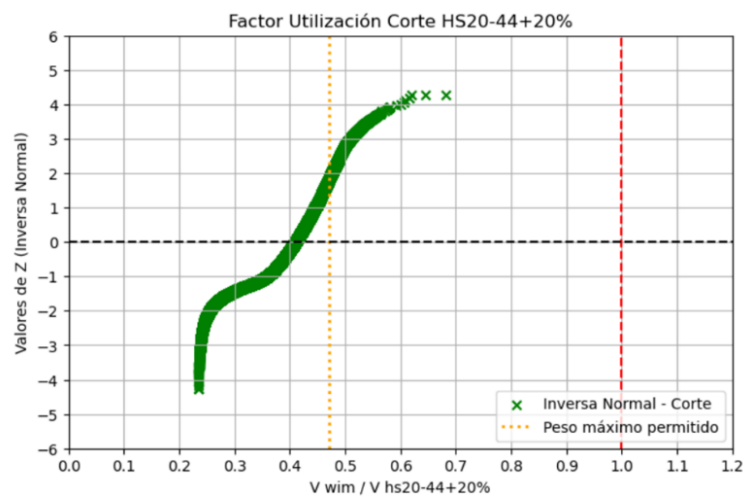


Figura A4.1.81 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 30m)

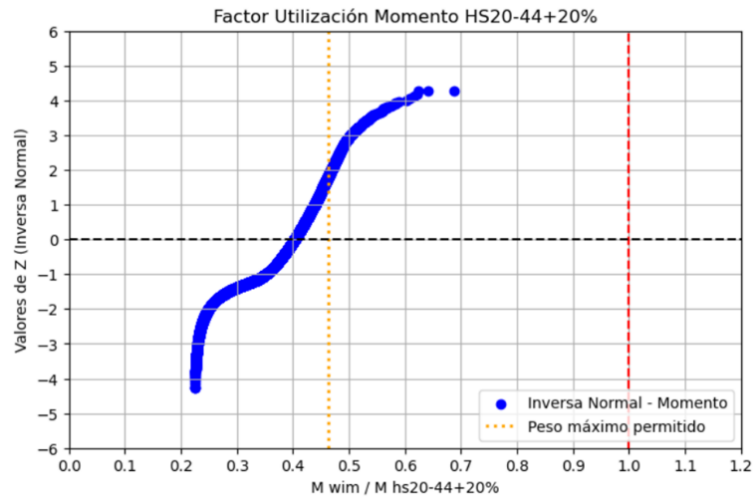


Figura A4.1.82 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 30m)

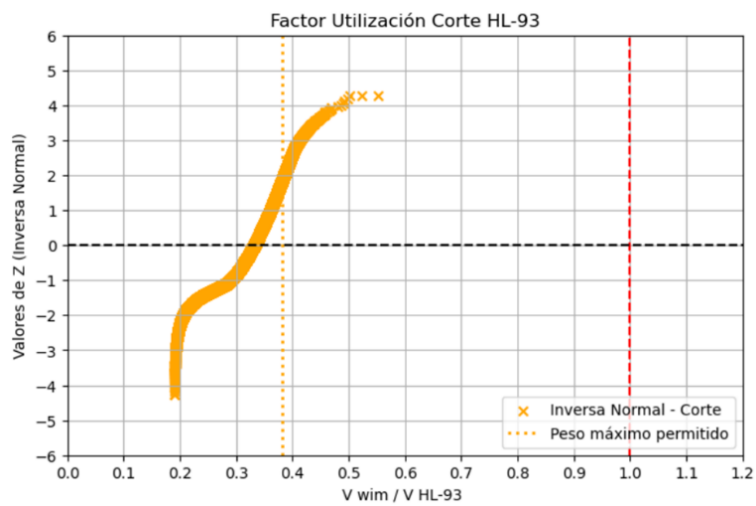


Figura A4.1.83 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 30m)

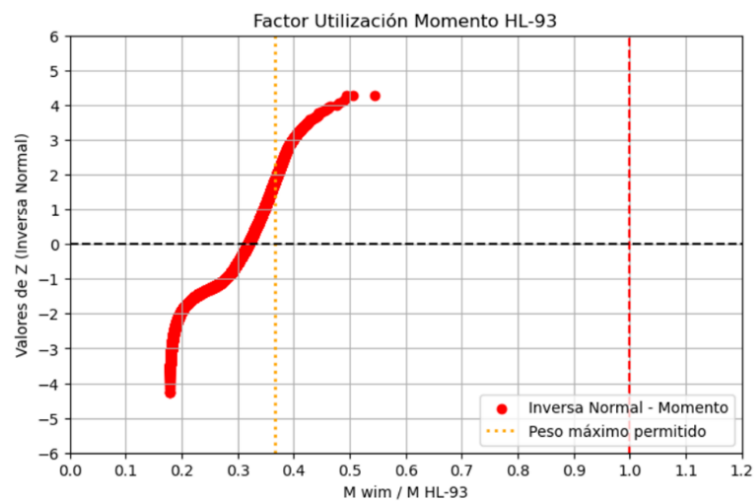


Figura A4.1.84 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 30m)

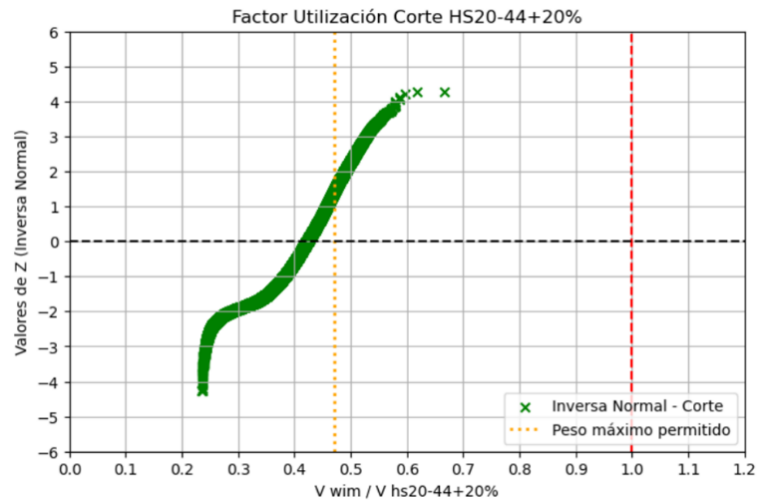


Figura A4.1.85 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 30m)

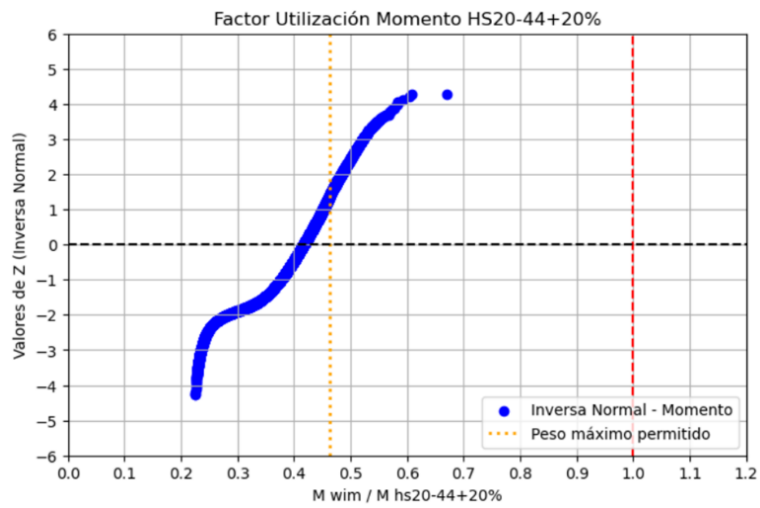


Figura A4.1.86 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 30m)

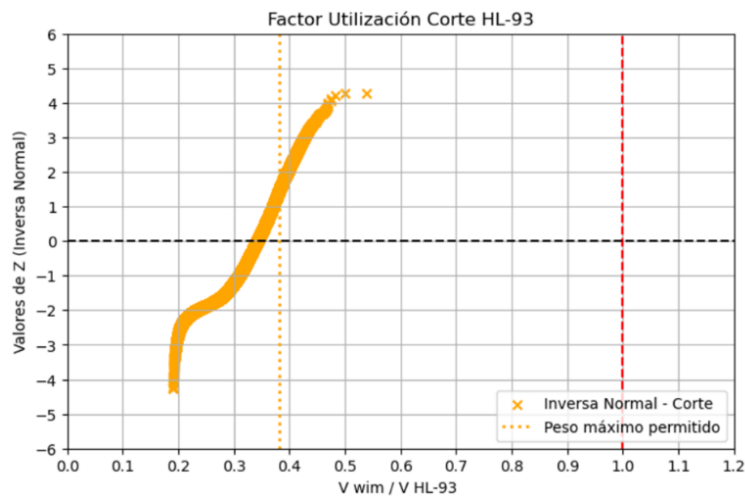


Figura A4.1.87 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 30m)

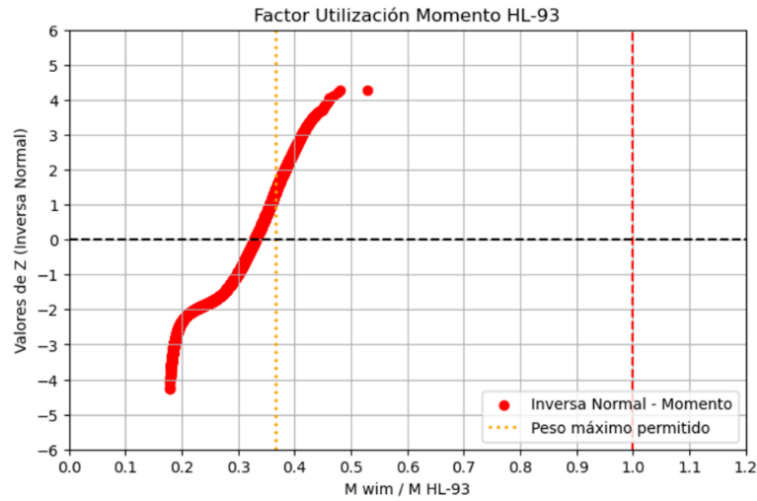


Figura A4.1.88 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 30m)

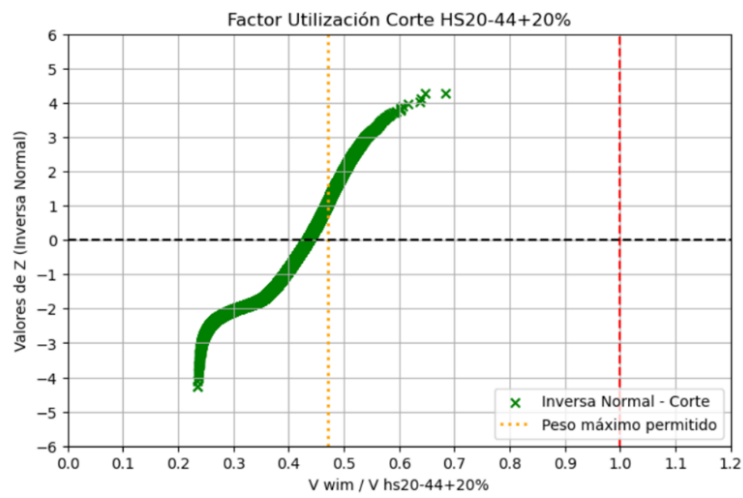


Figura A4.1.89 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 30m)

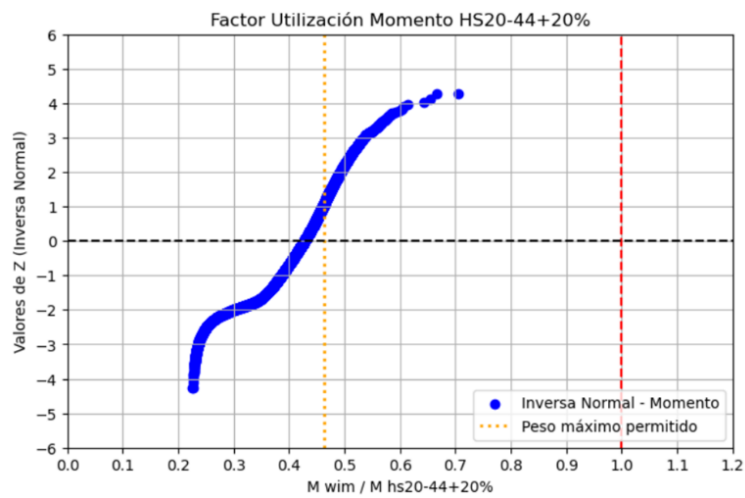


Figura A4.1.90 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 30m)

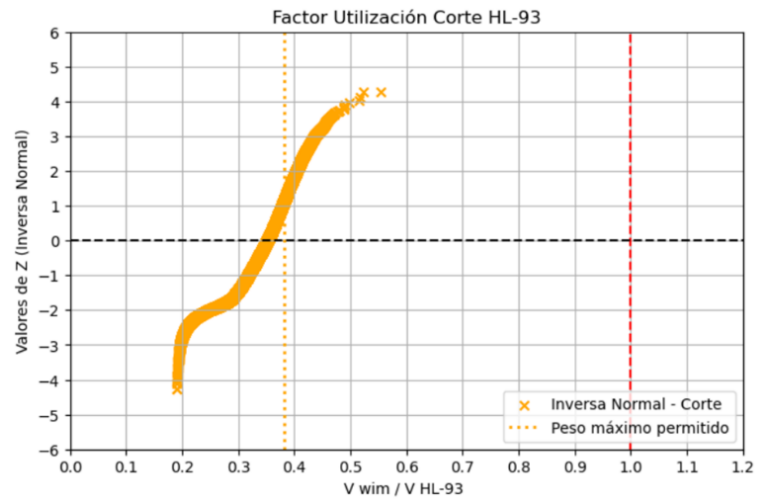


Figura A4.1.91 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 30m)

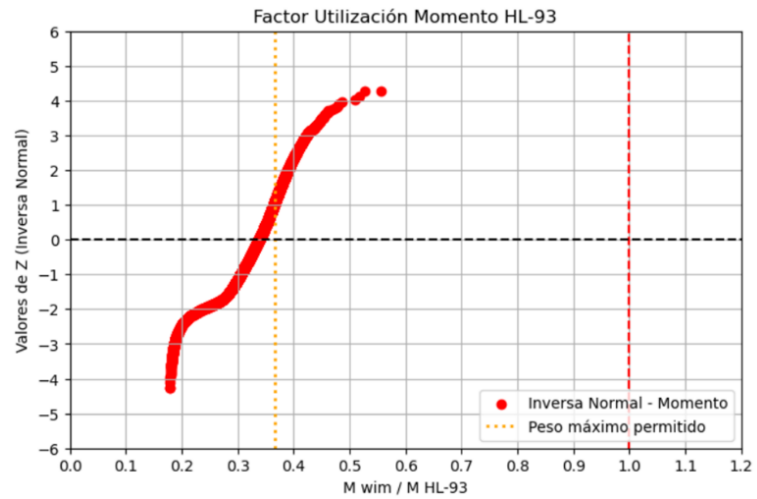


Figura A4.1.92 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 30m)

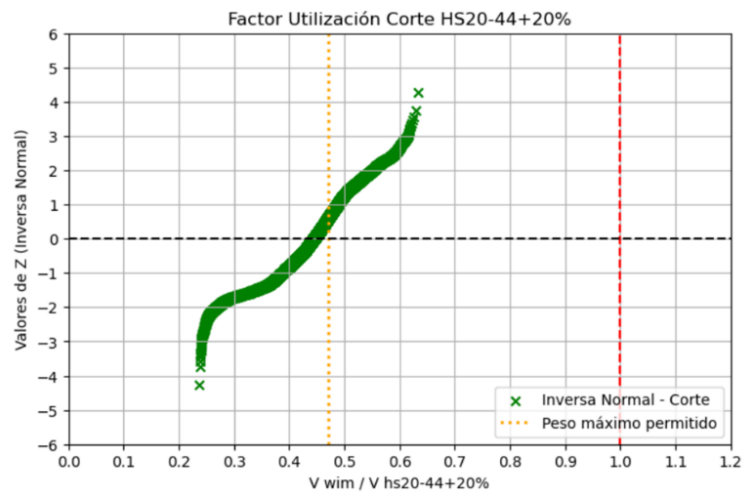


Figura A4.1.93 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 30m)

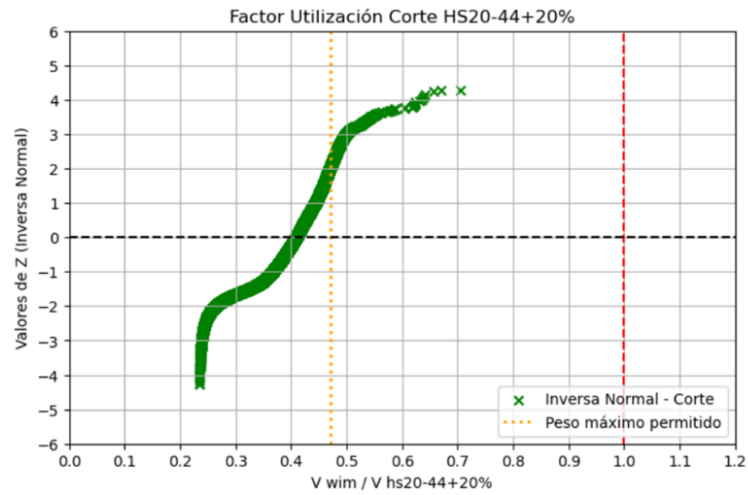


Figura A4.1.97 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 30m)

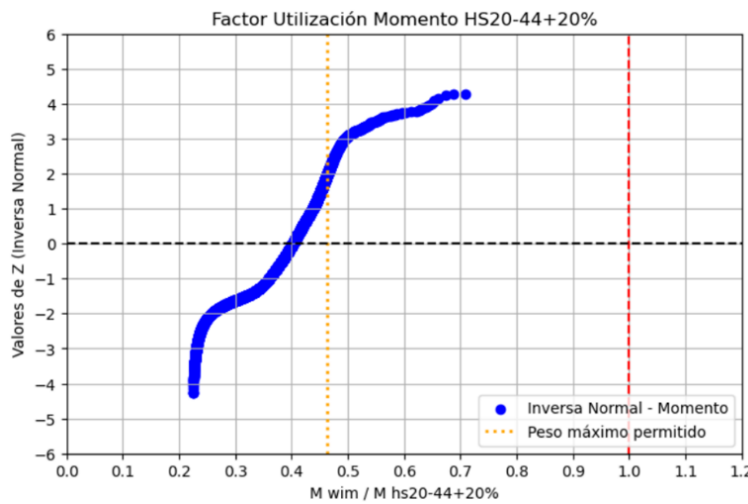


Figura A4.1.98 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 30m)

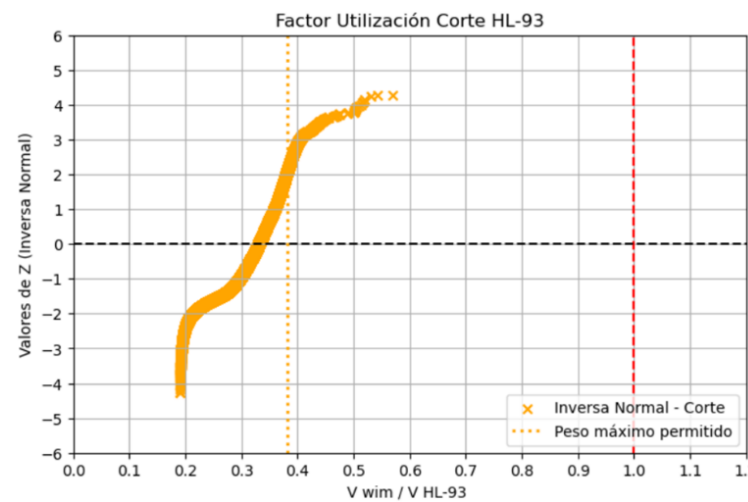


Figura A4.1.99 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 30m)

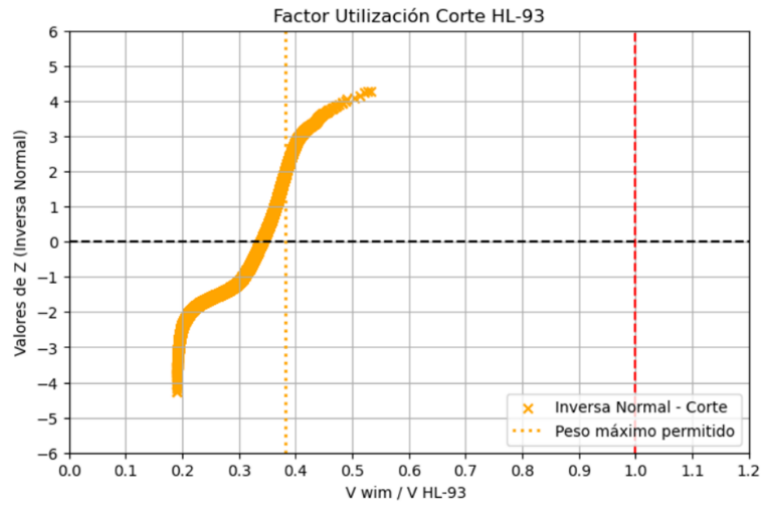


Figura A4.1.103 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 30m)

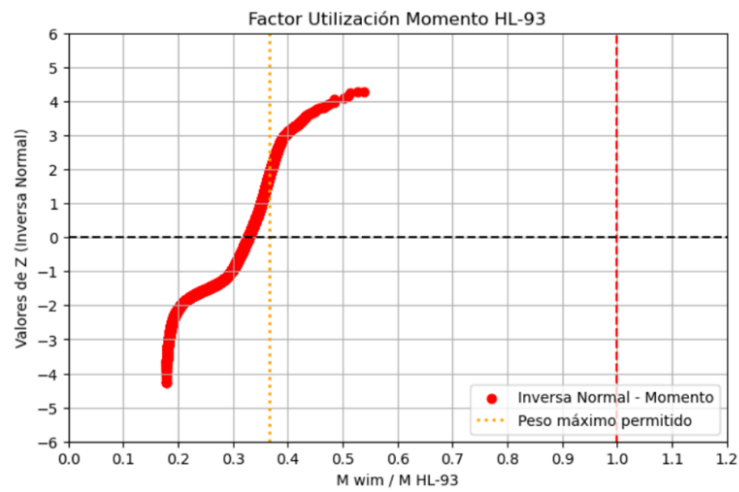


Figura A4.1.104 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 30m)

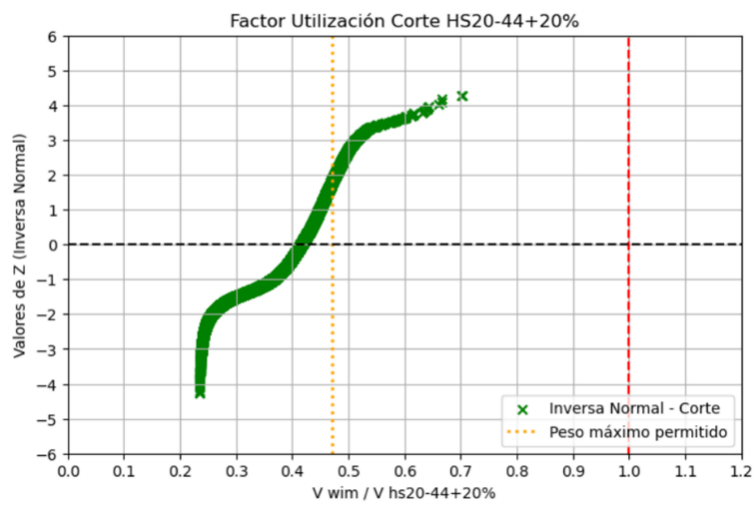


Figura A4.1.105 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 30m)

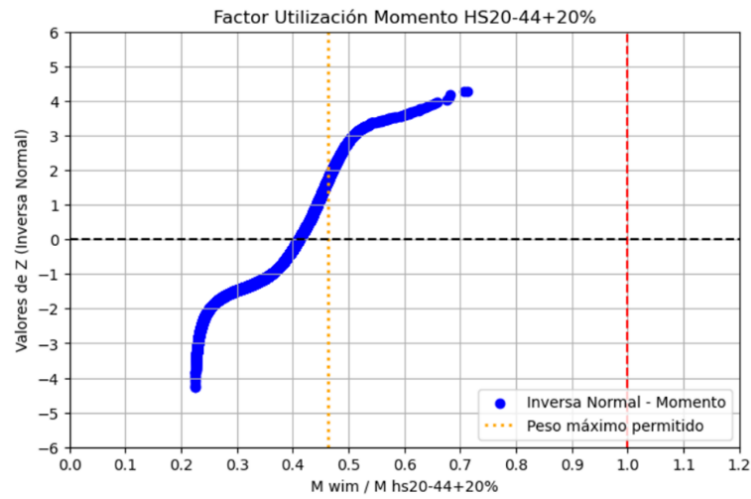


Figura A4.1.106 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 30m)

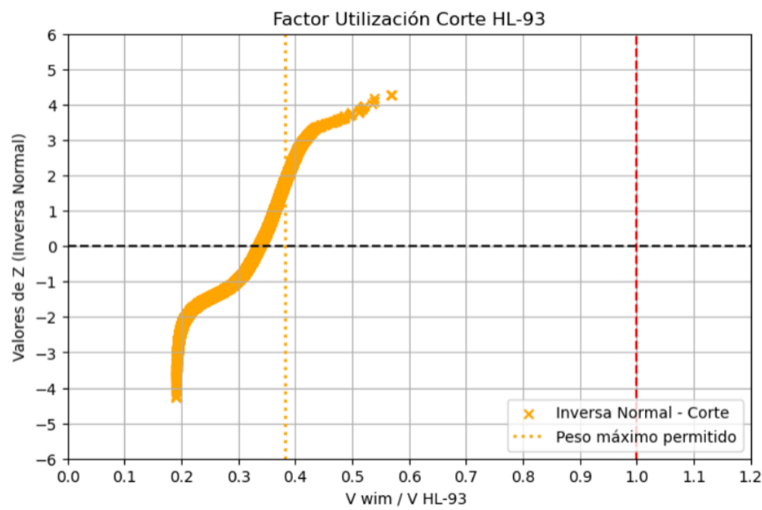


Figura A4.1.107 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 30m)

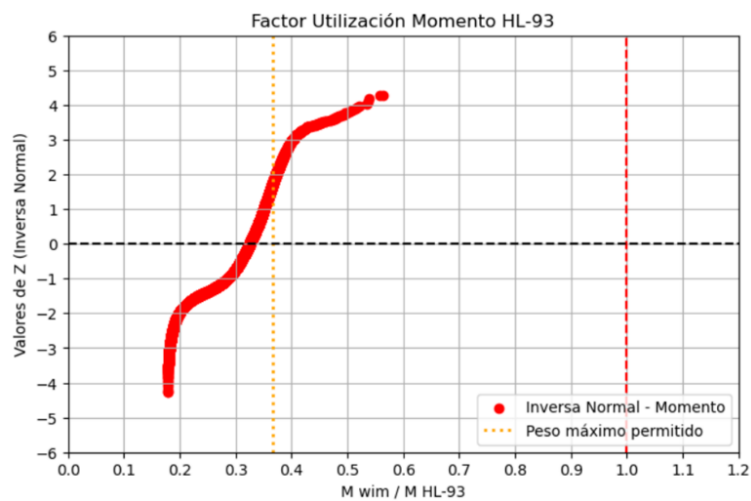


Figura A4.1.108 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 30m)

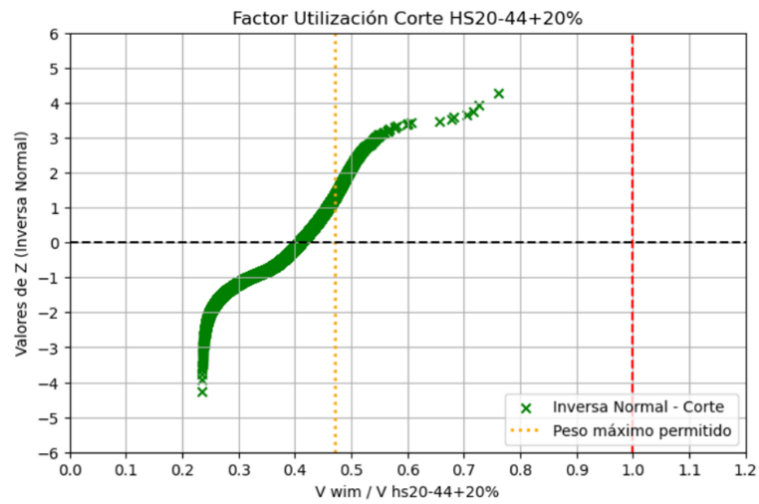


Figura A4.1.109 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 30m)

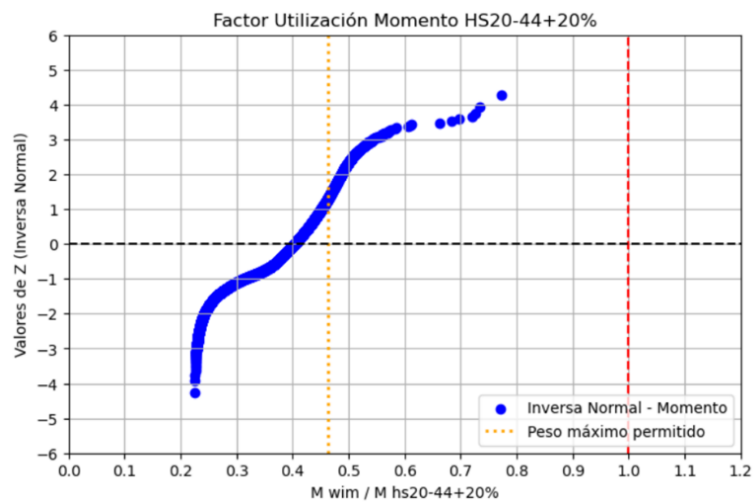


Figura A4.1.110 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 30m)

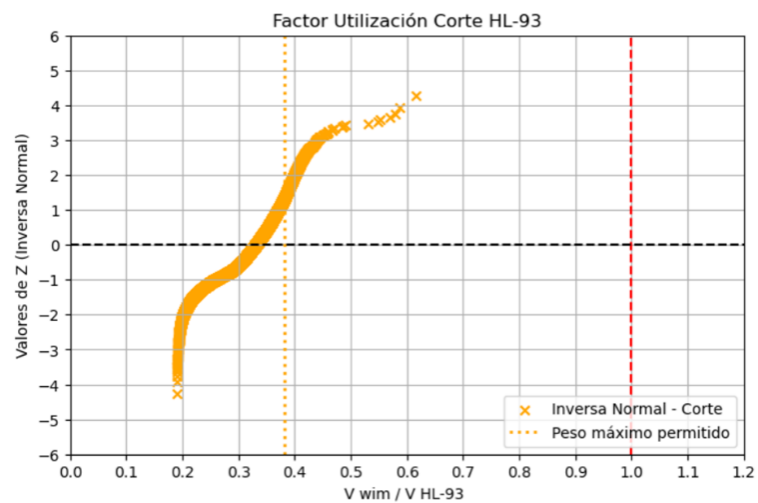


Figura A4.1.111 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 30m)

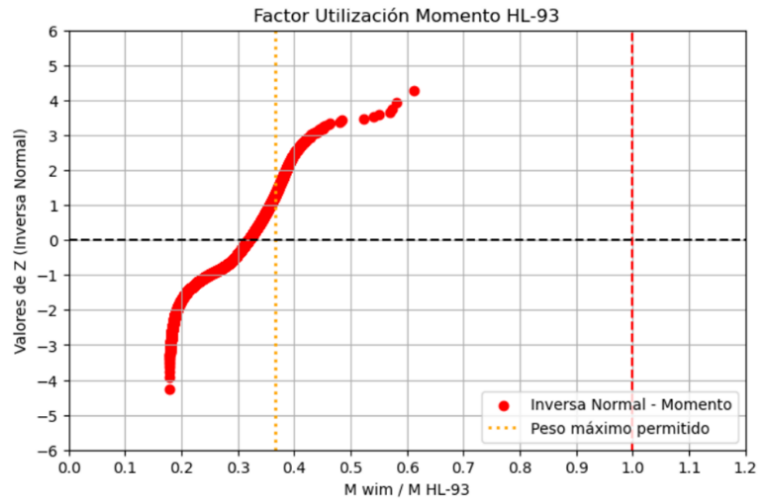


Figura A4.1.112 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 30m)

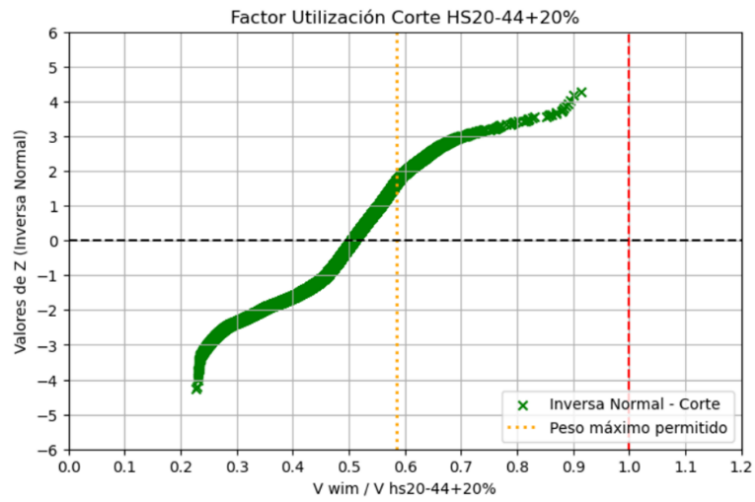


Figura A4.1.113 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 30m)

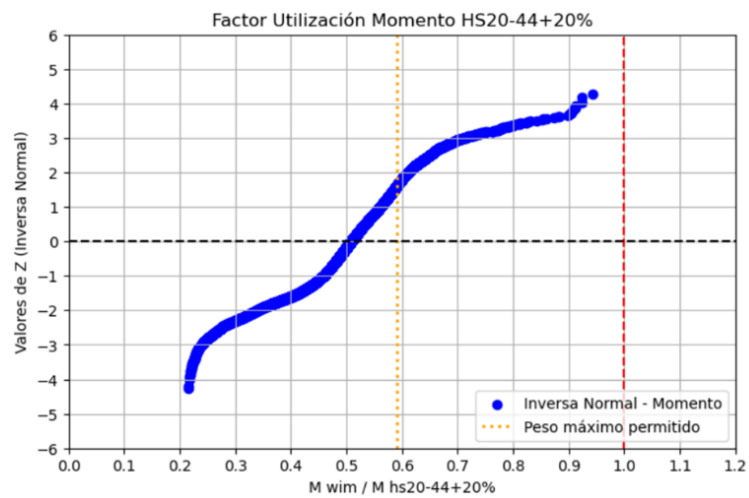


Figura A4.1.114 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 30m)

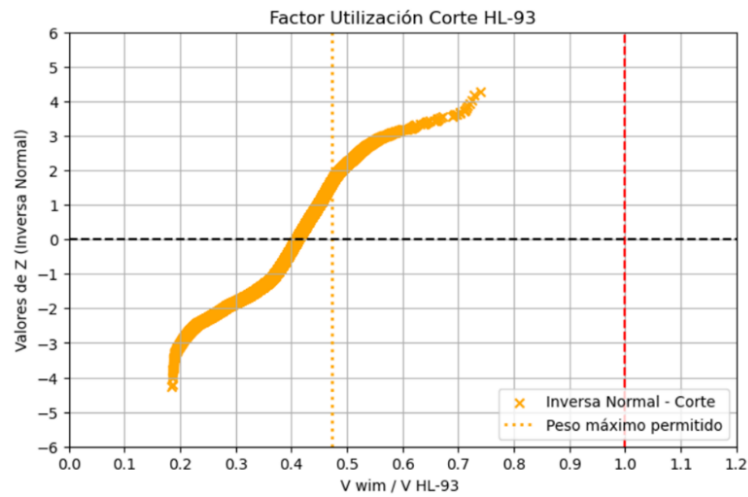


Figura A4.1.115 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 30m)

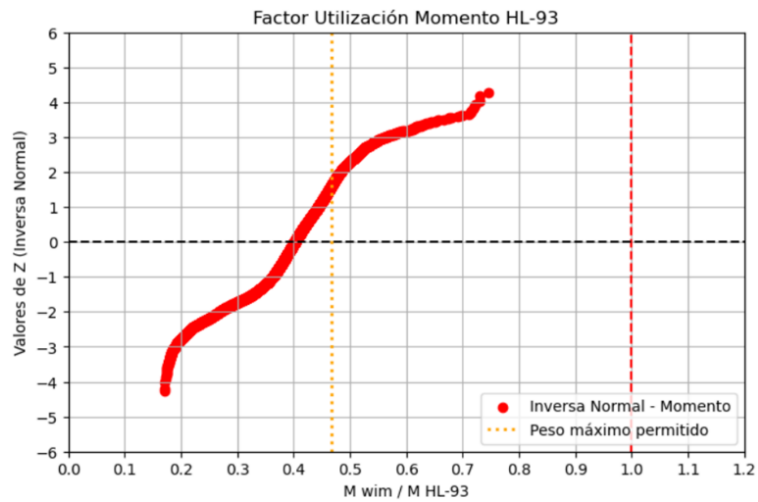


Figura A4.1.116 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 30m)

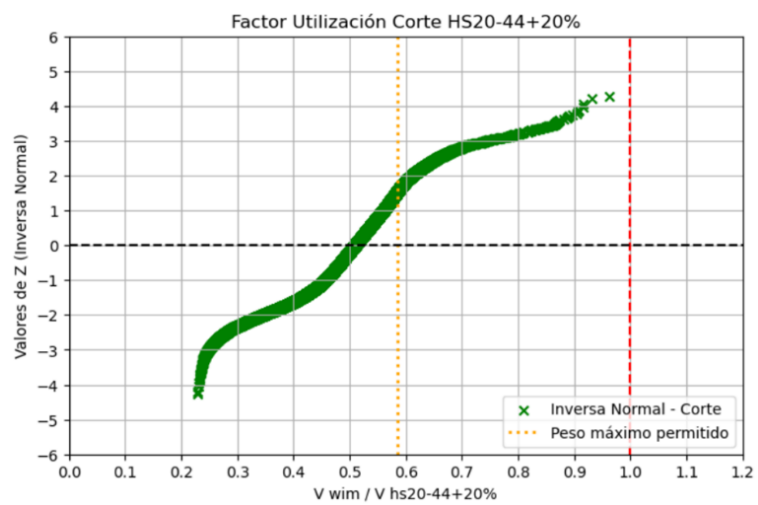


Figura A4.1.117 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 30m)

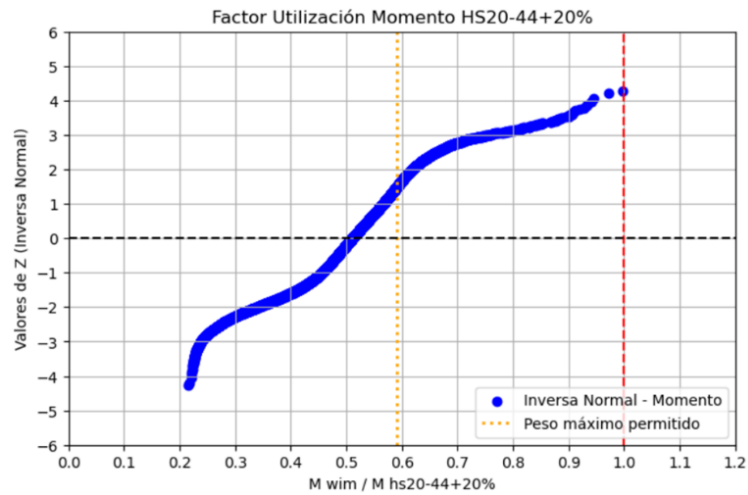


Figura A4.1.118 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 30m)

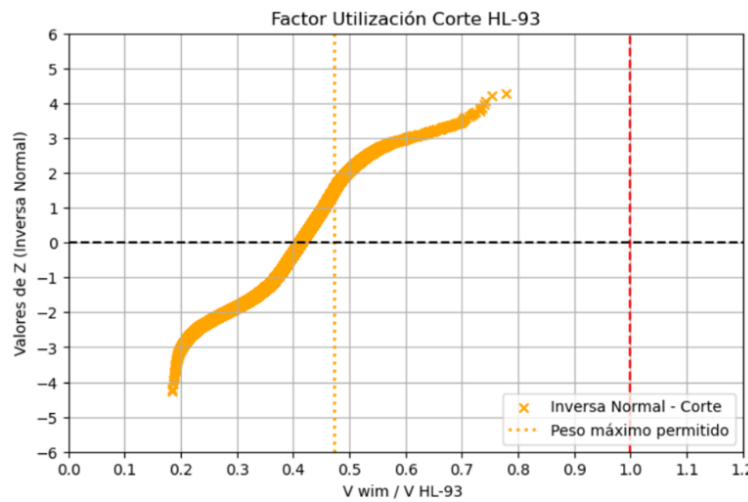


Figura A4.1.119 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 30m)

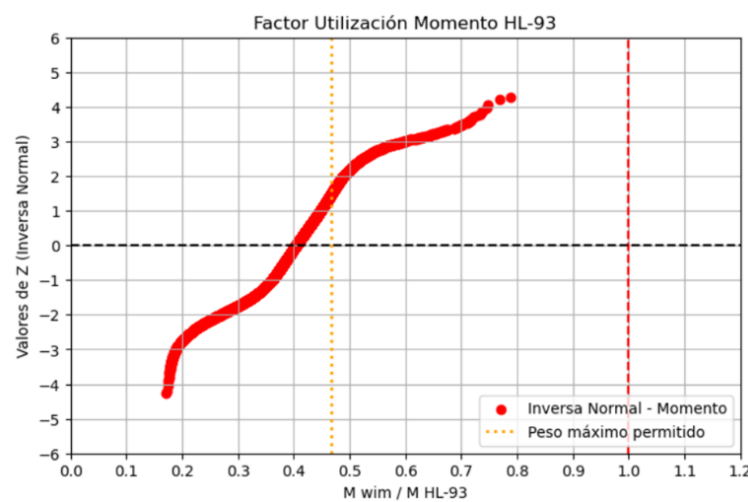


Figura A4.1.120 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2017 vano 30m)

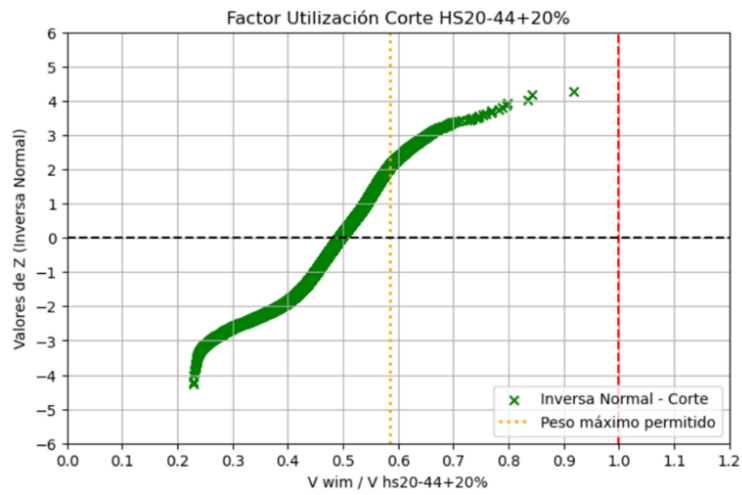


Figura A4.1.121 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 30m)

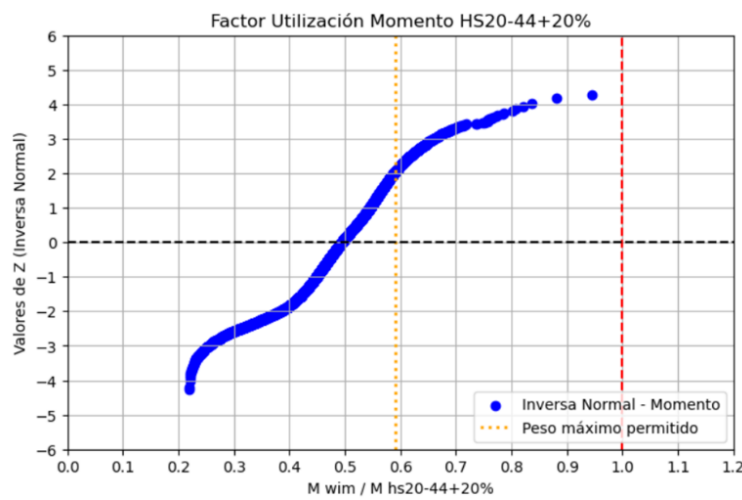


Figura A4.1.122 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 30m)

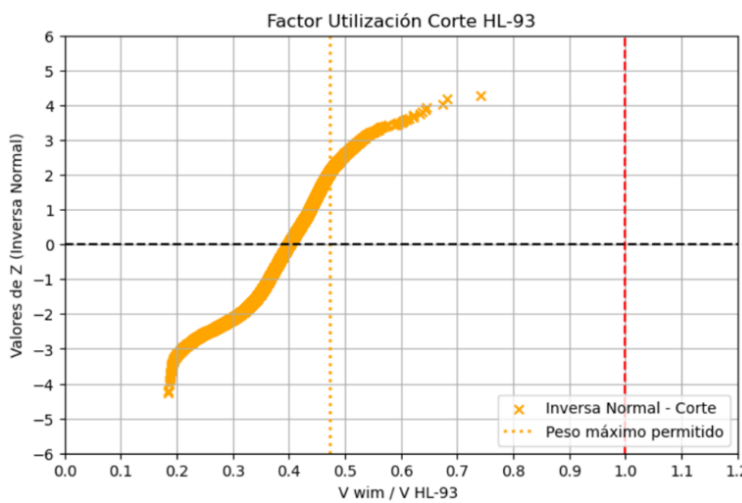


Figura A4.1.123 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 30m)

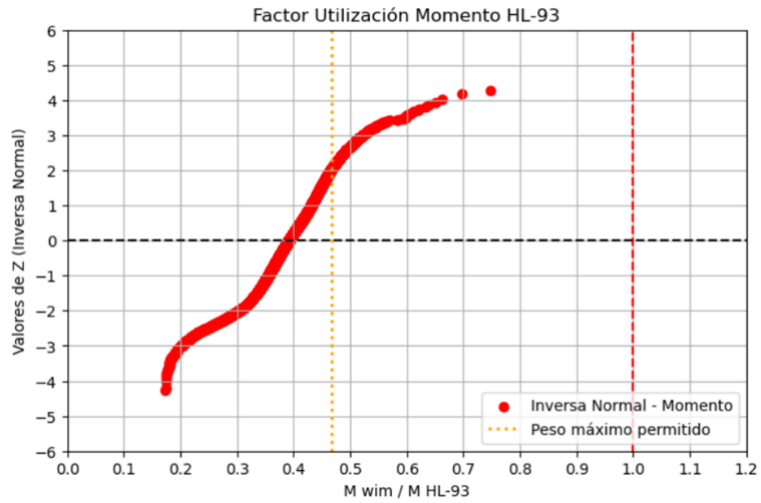


Figura A4.1.124 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018 vano 30m)

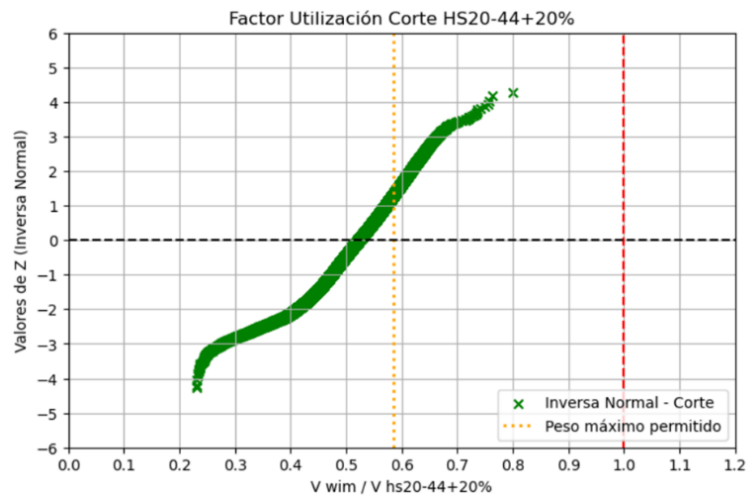


Figura A4.1.125 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 30m)

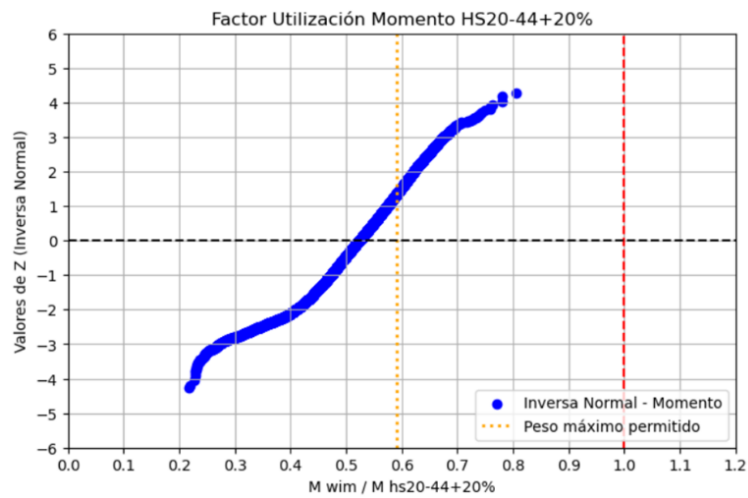


Figura A4.1.126 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 30m)

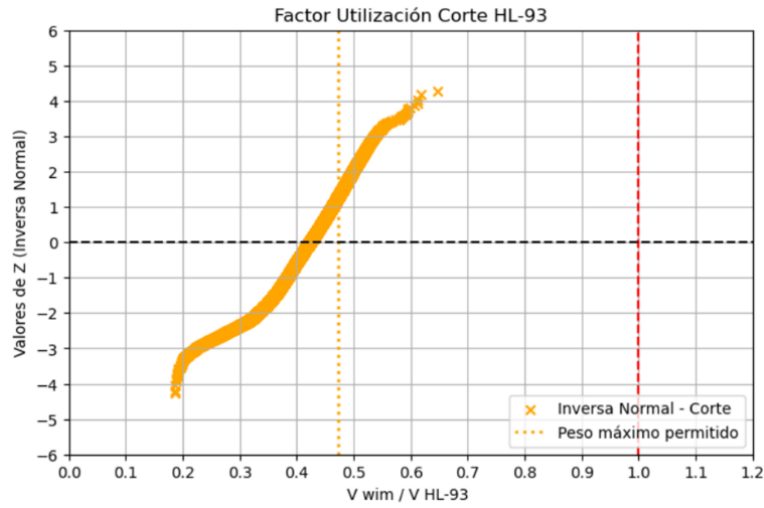


Figura A4.1.127 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 30m)

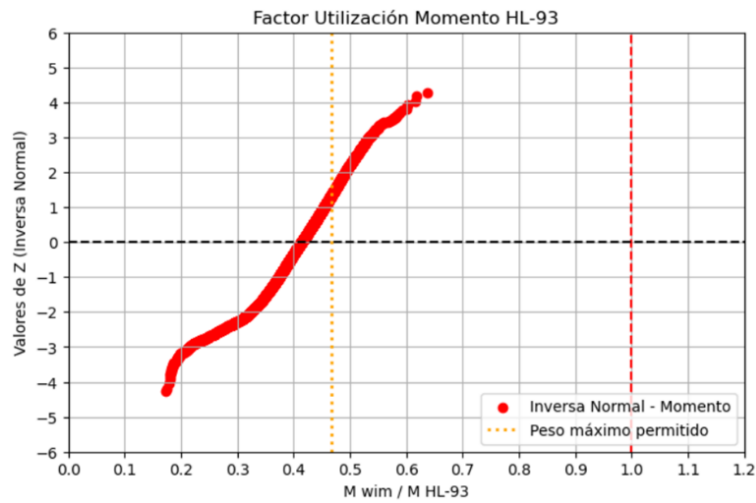


Figura A4.1.128 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019 vano 30m)

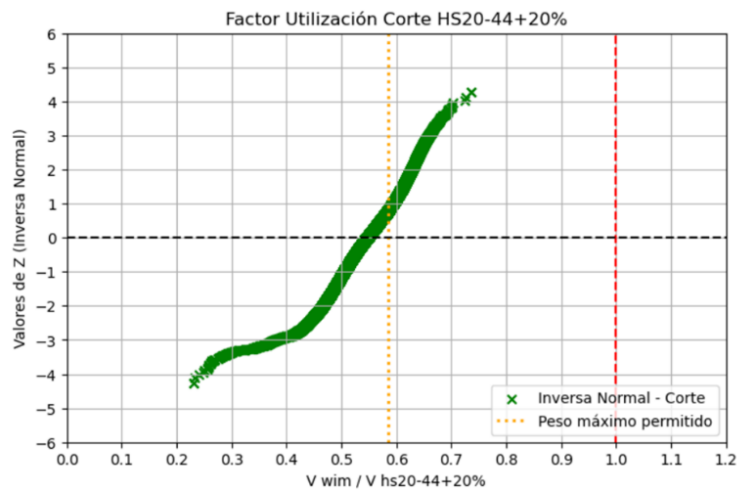


Figura A4.1.129 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 30m)

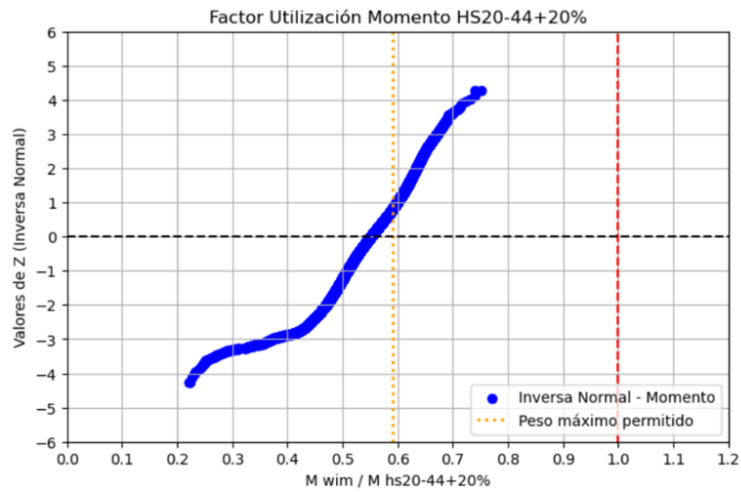


Figura A4.1.130 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 30m)

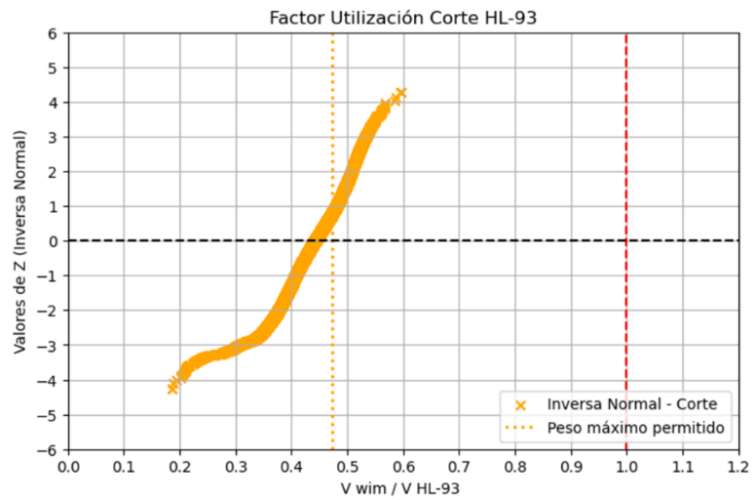


Figura A4.1.131 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 30m)

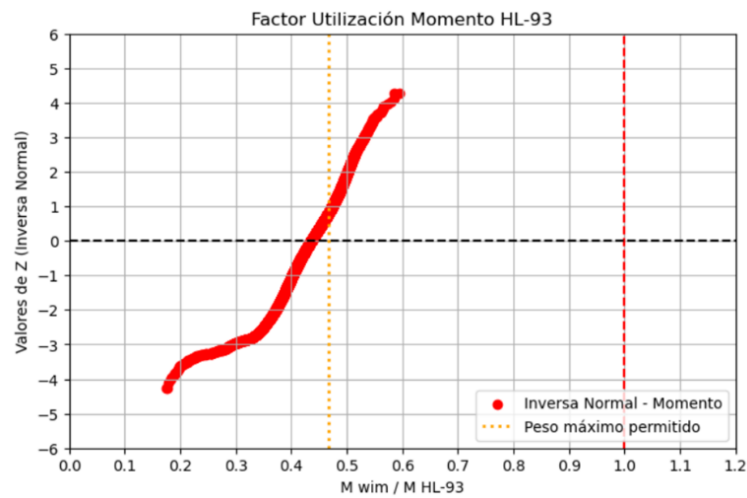


Figura A4.1.132 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022 vano 30m)

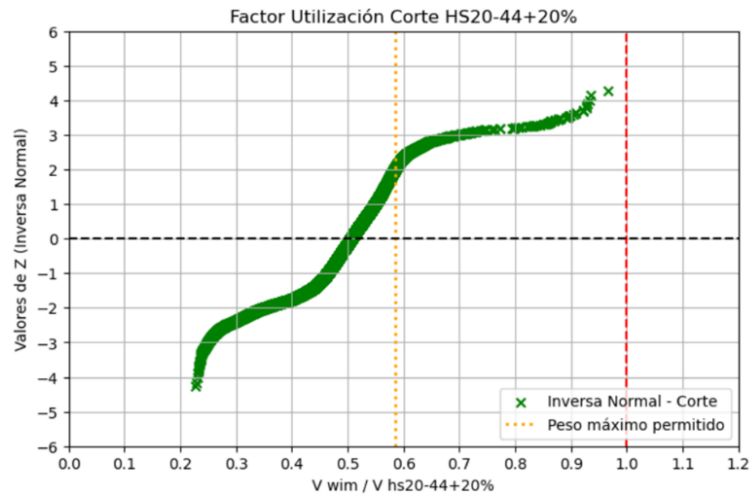


Figura A4.1.133 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 30m)

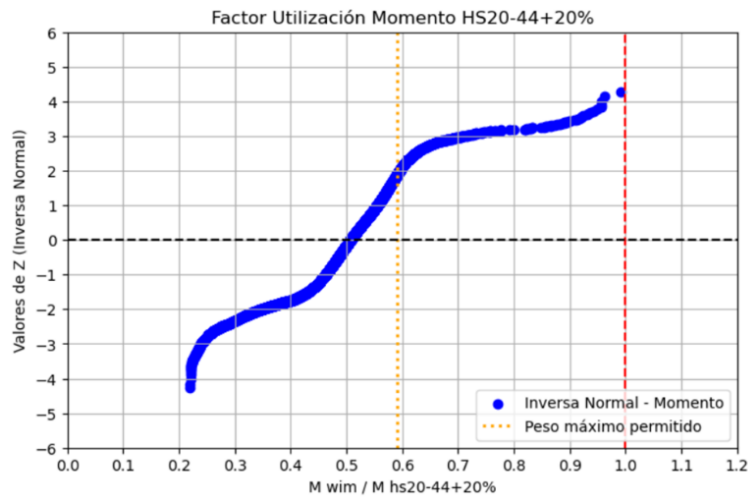


Figura A4.1.134 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 30m)

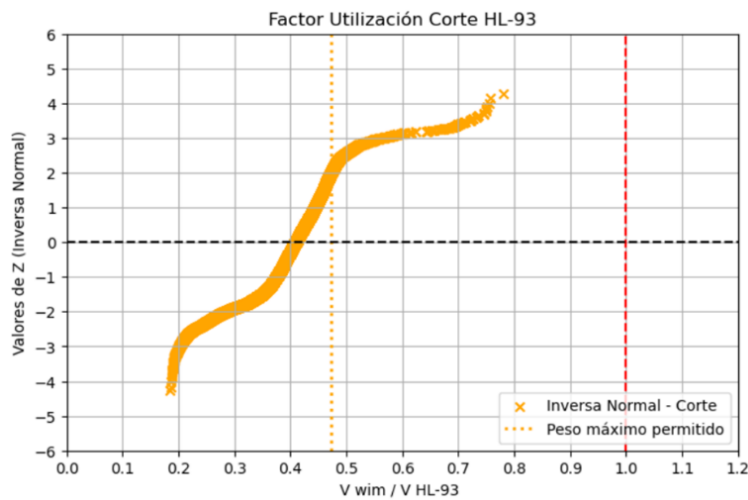


Figura A4.1.135 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 30m)

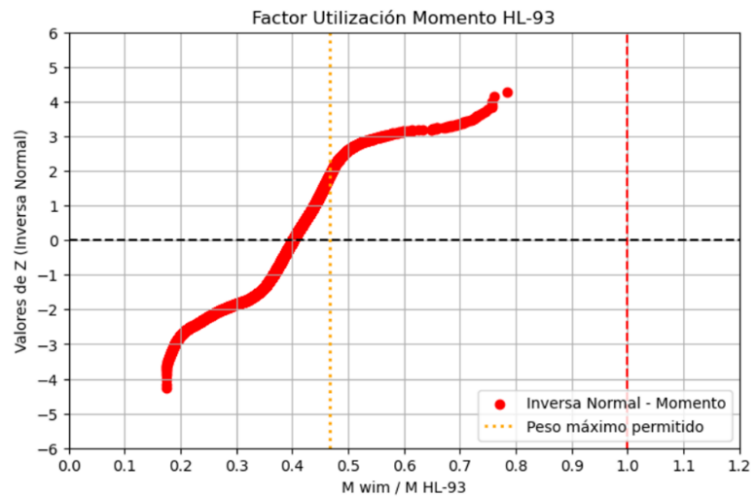


Figura A4.1.136 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2016 vano 30m)

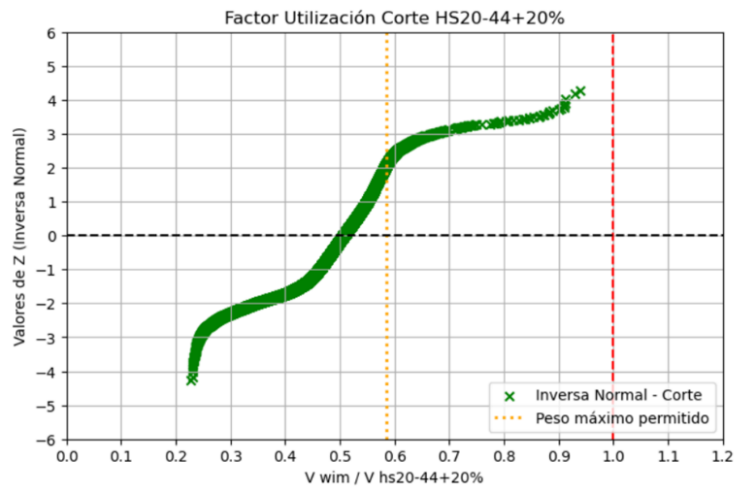


Figura A4.1.137 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 30m)

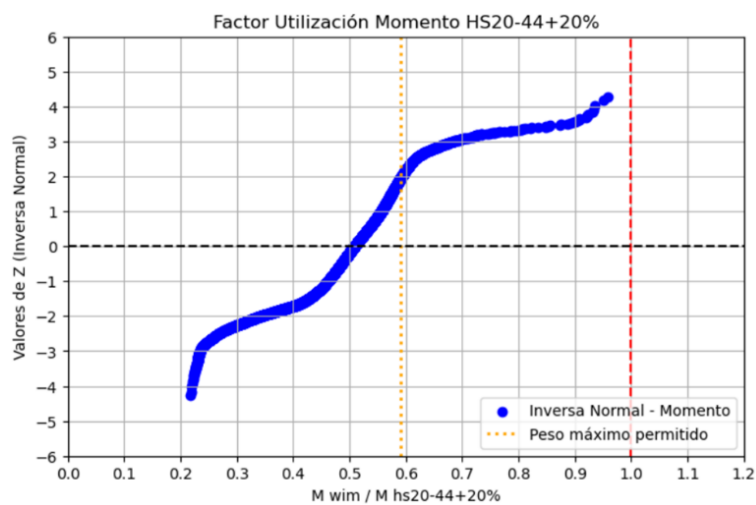


Figura A4.1.138 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 30m)

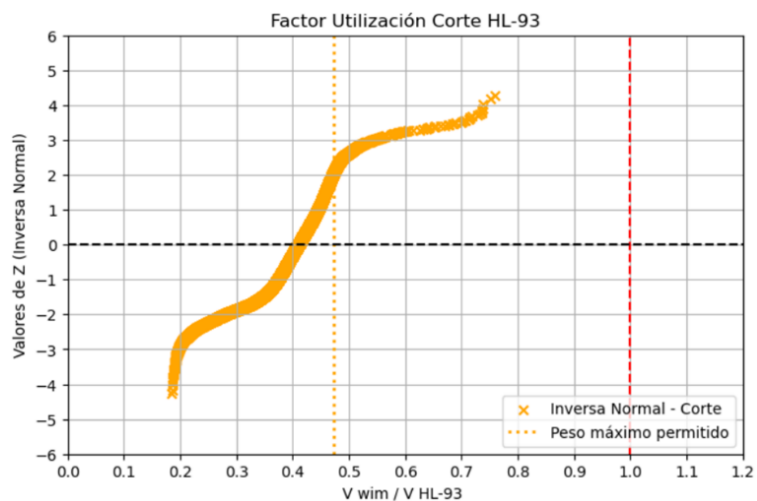


Figura A4.1.139 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 30m)

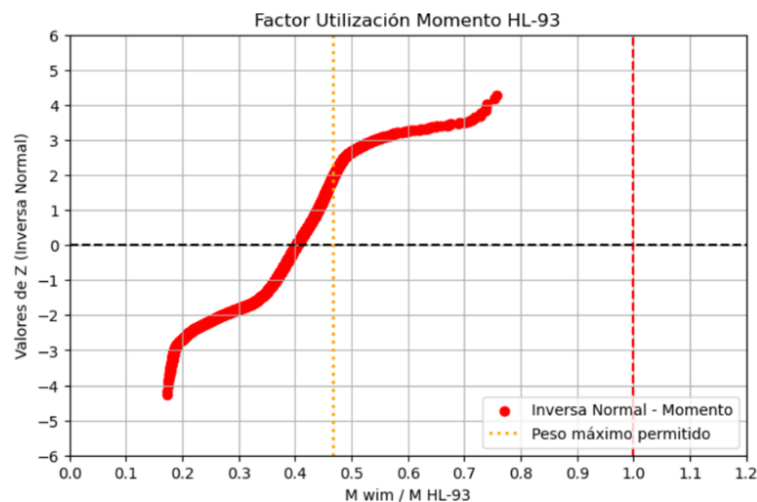


Figura A4.1.140 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2017 vano 30m)

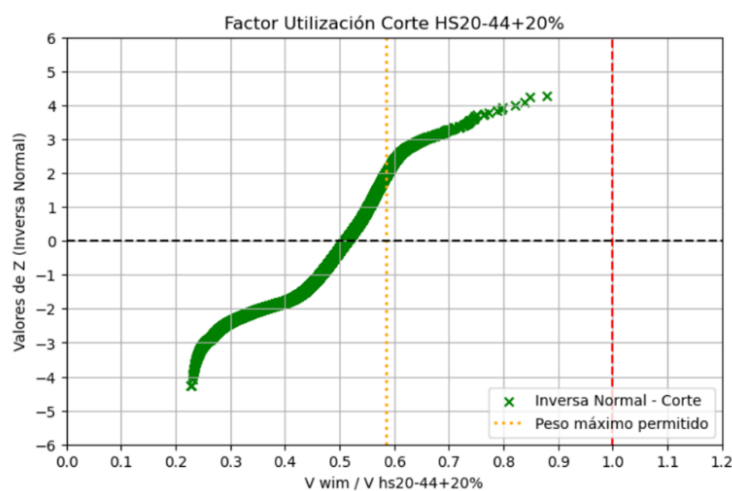


Figura A4.1.141 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 30m)

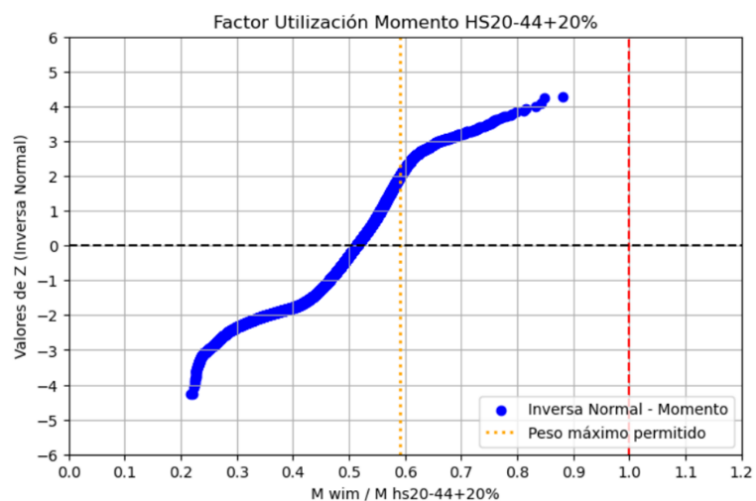


Figura A4.1.142 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 30m)

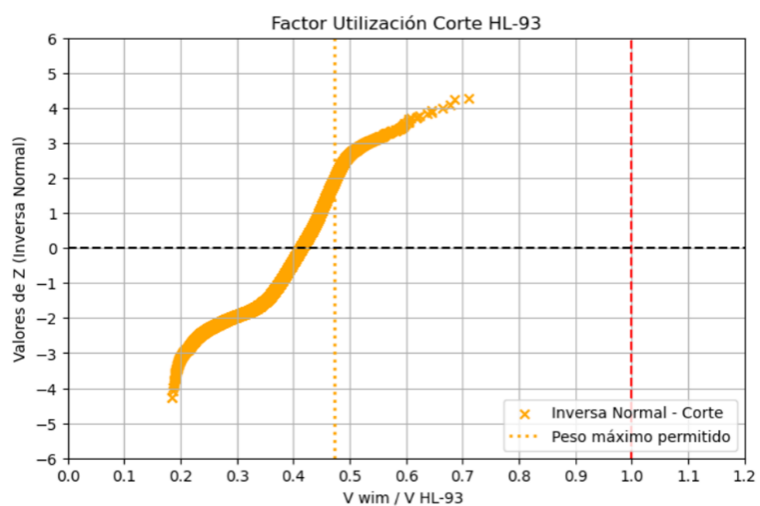


Figura A4.1.143 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 30m)

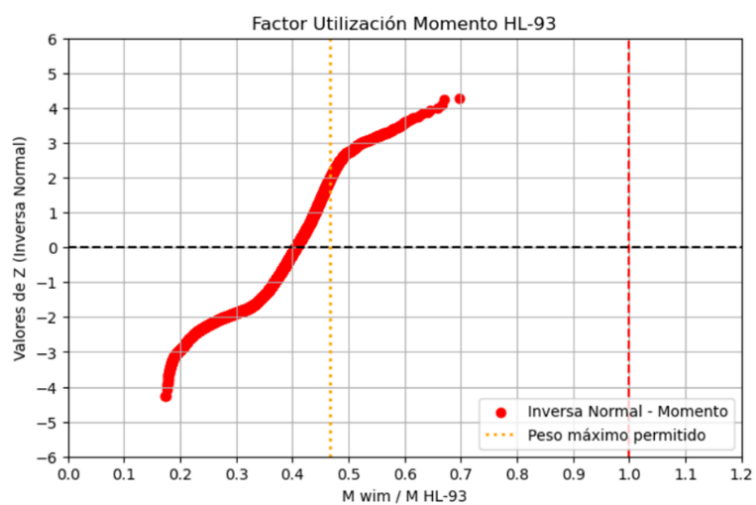


Figura A4.1.144 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019 vano 30m)

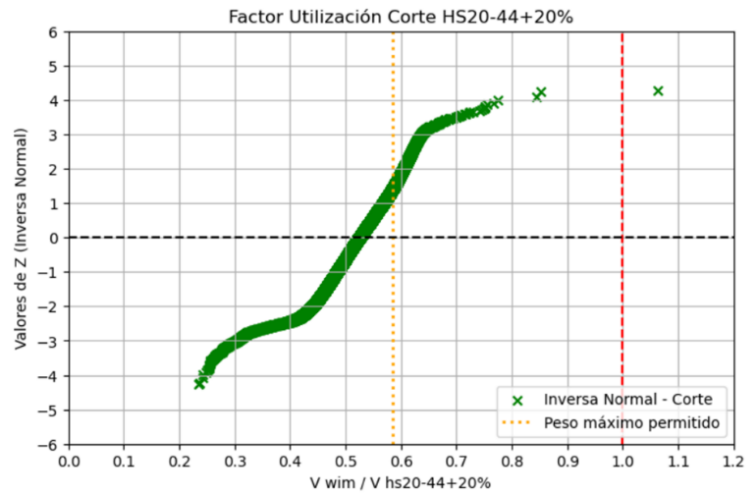


Figura A4.1.145 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 30m)

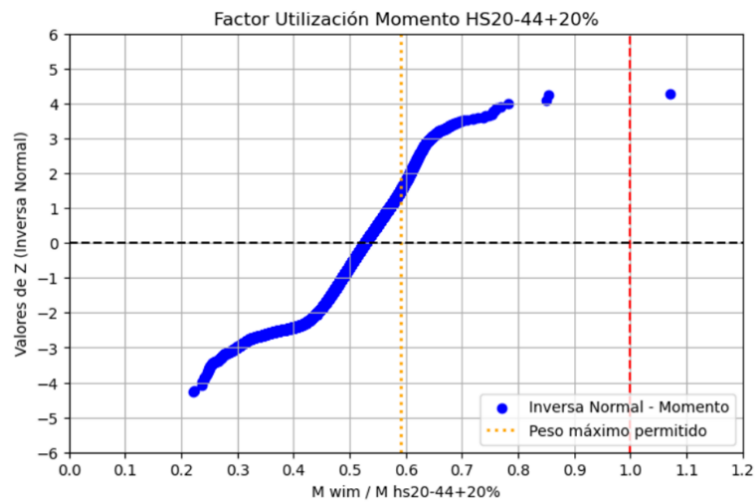


Figura A4.1.146 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 30m)

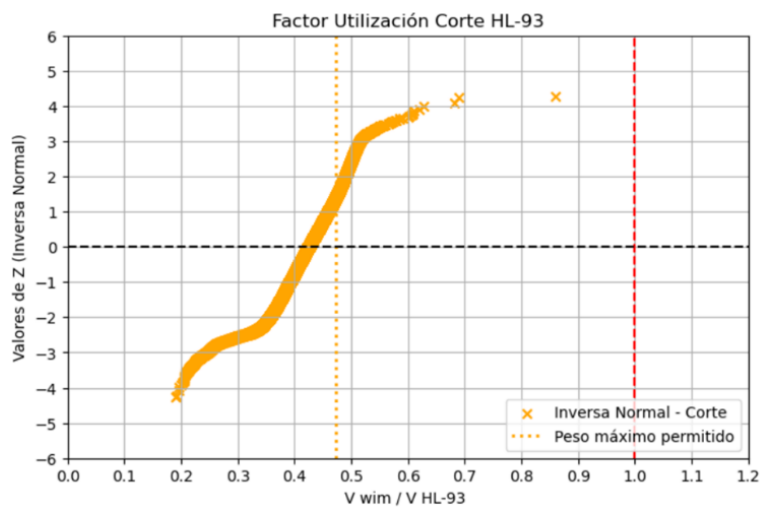


Figura A4.1.147 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 30m)

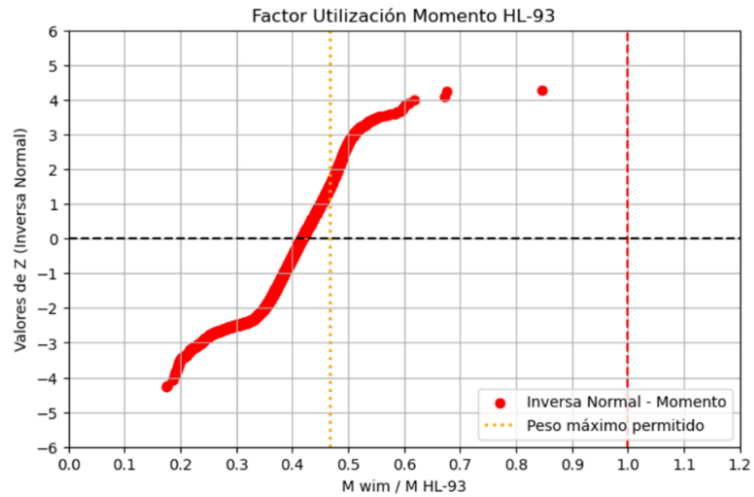


Figura A4.1.148 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022 vano 30m)

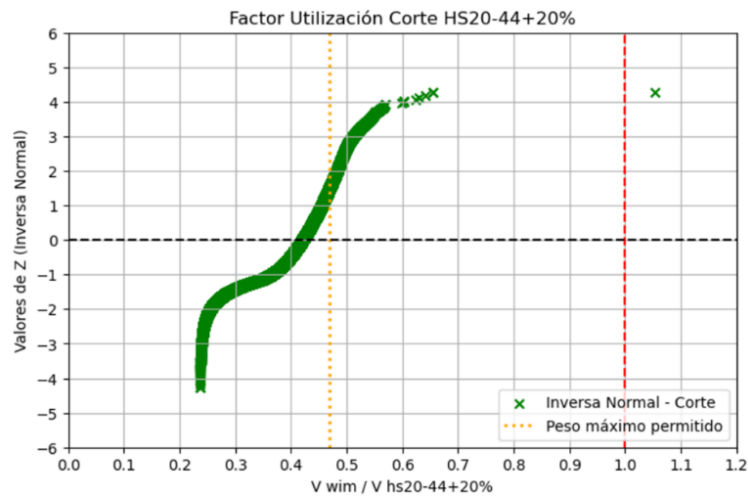


Figura A4.1.149 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 50m)

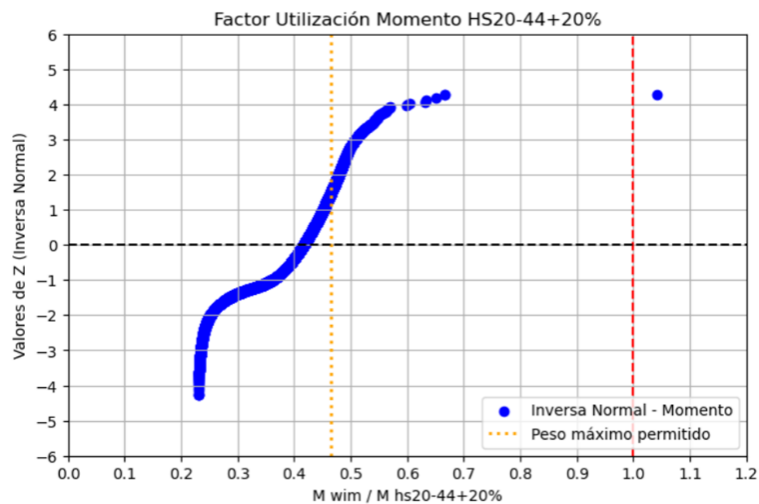


Figura A4.1.150 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 50m)

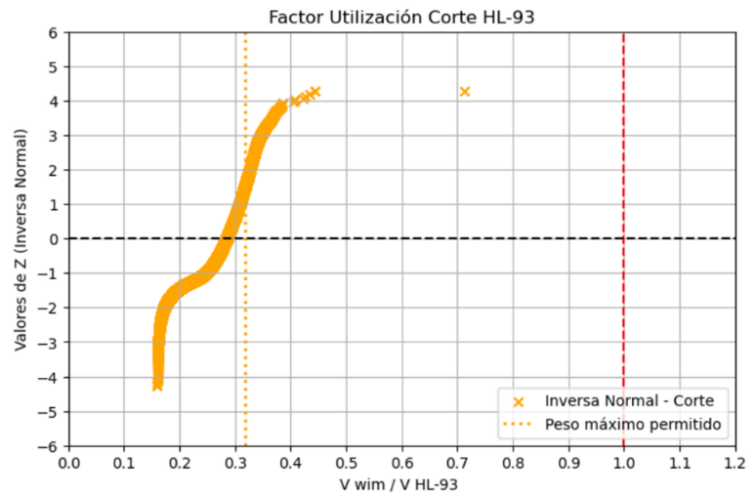


Figura A4.1.151 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 50m)

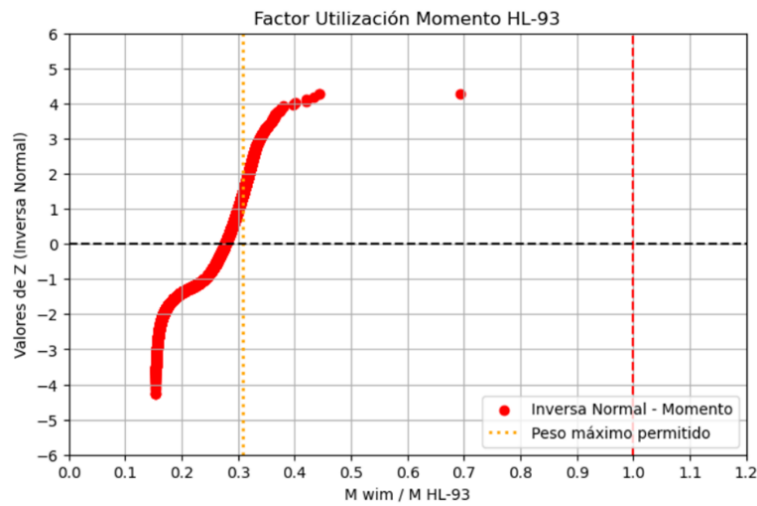


Figura A4.1.152 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 50m)

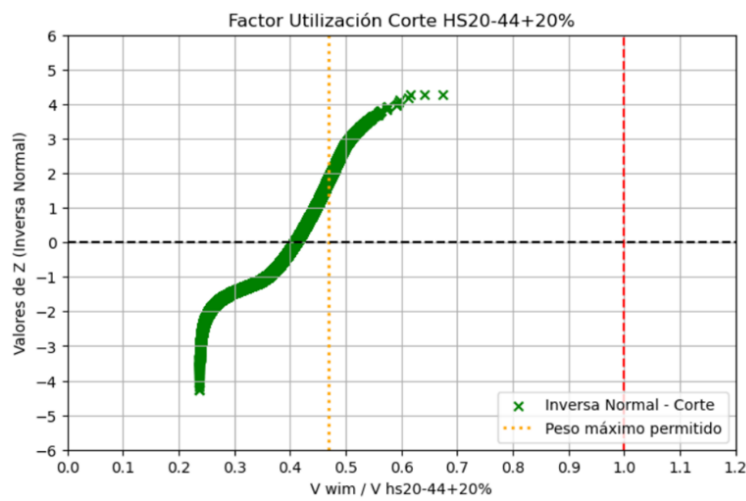


Figura A4.1.153 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 50m)

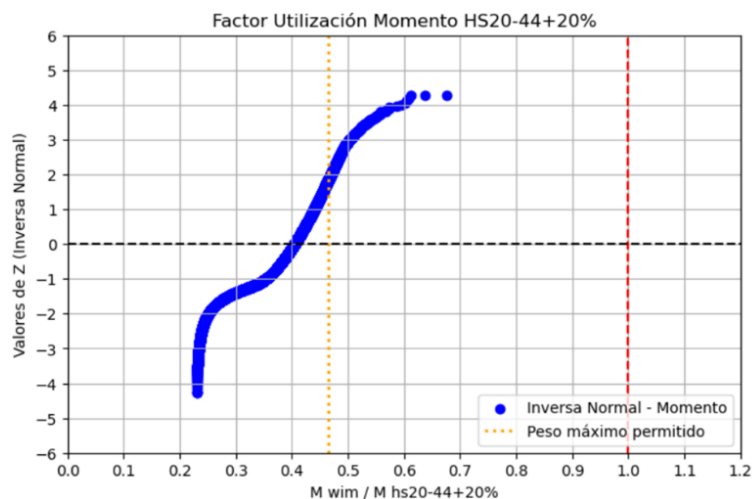


Figura A4.1.154 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 50m)

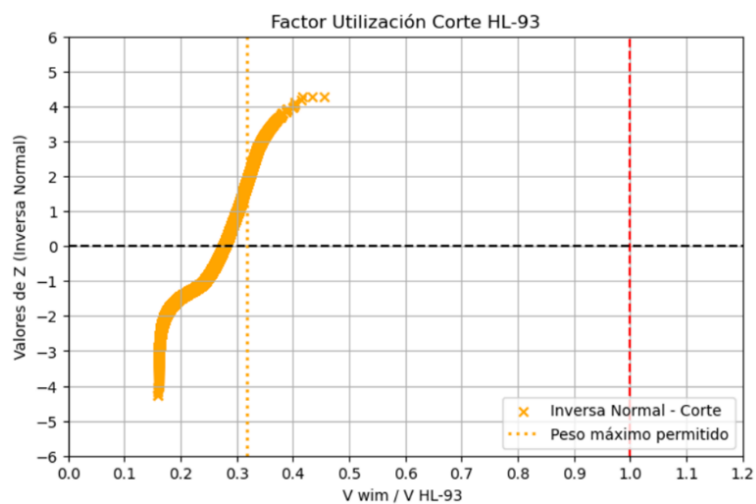


Figura A4.1.155 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 50m)

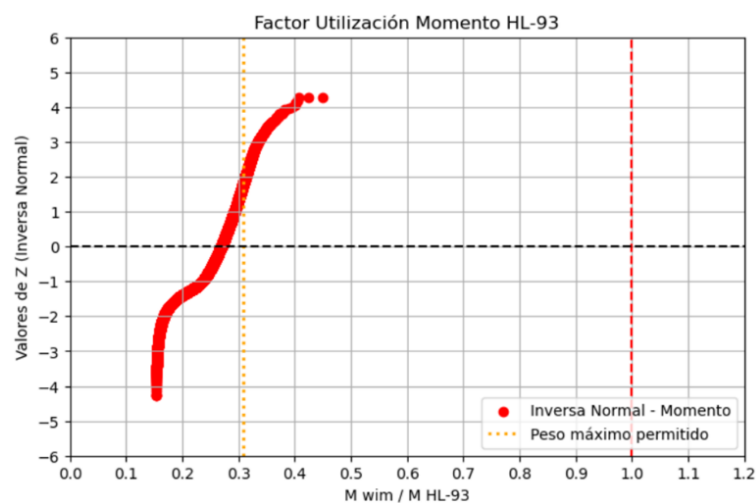


Figura A4.1.156 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 50m)

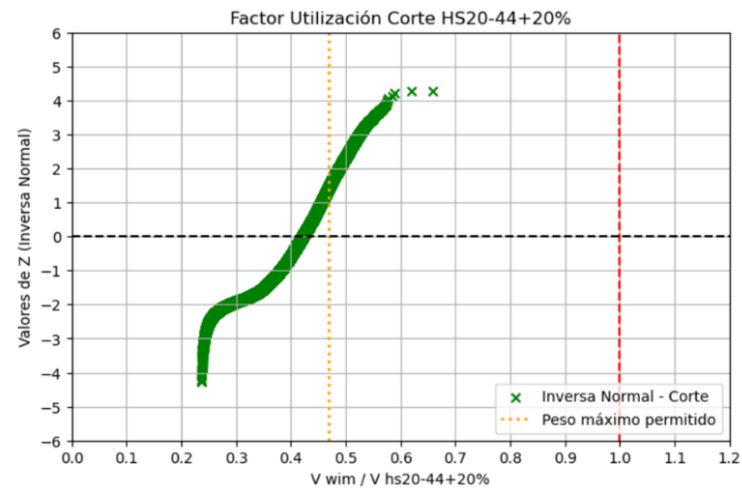


Figura A4.1.157 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 50m)

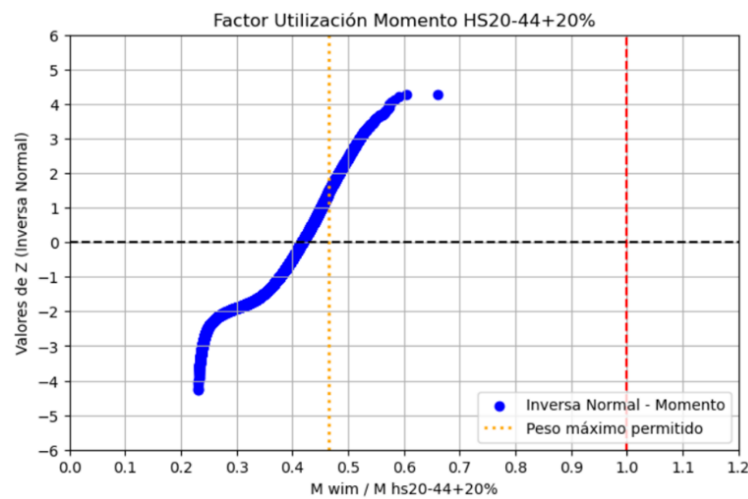


Figura A4.1.158 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 50m)

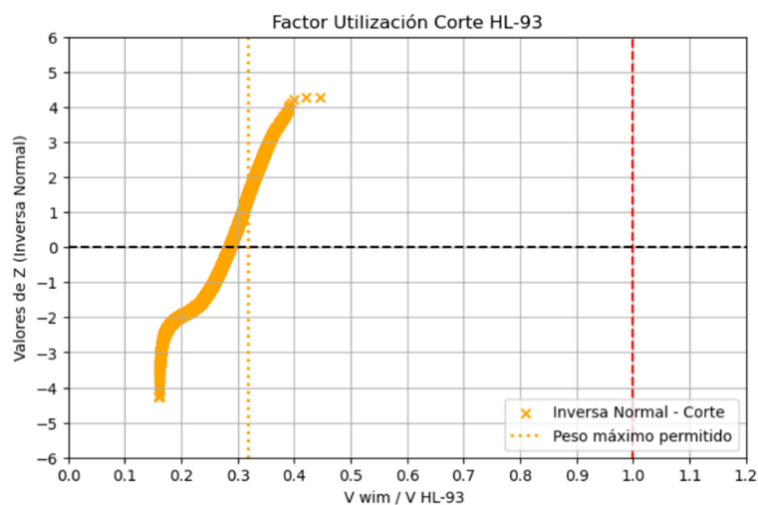


Figura A4.1.159 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 50m)

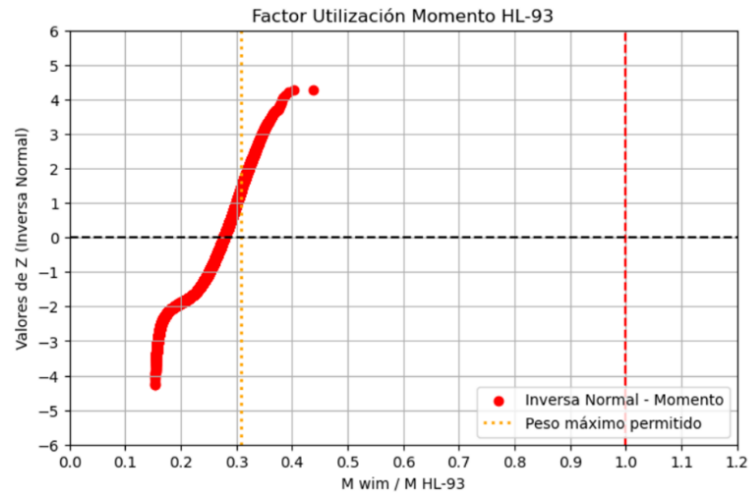


Figura A4.1.160 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 50m)

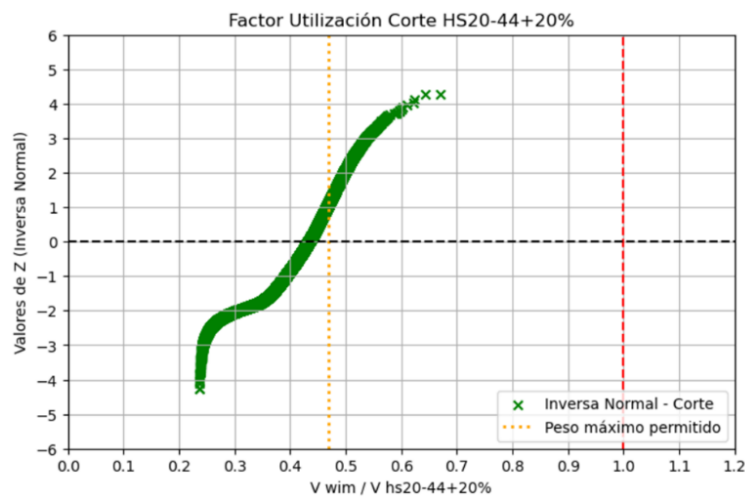


Figura A4.1.161 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 50m)

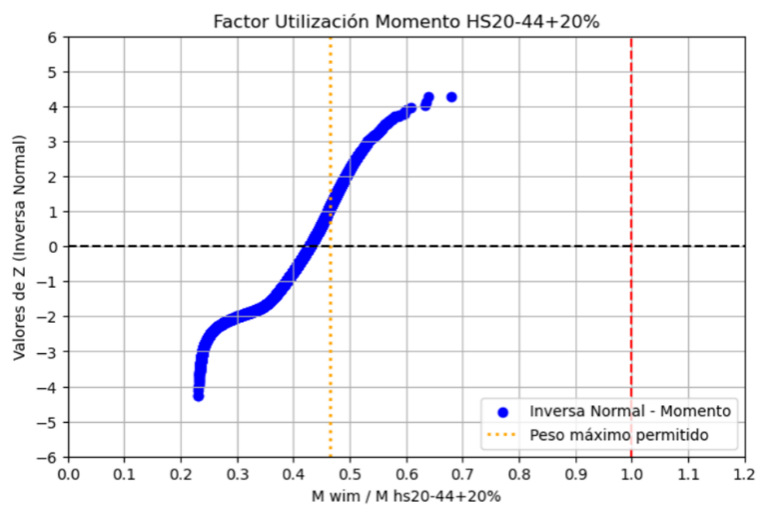


Figura A4.1.162 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 50m)

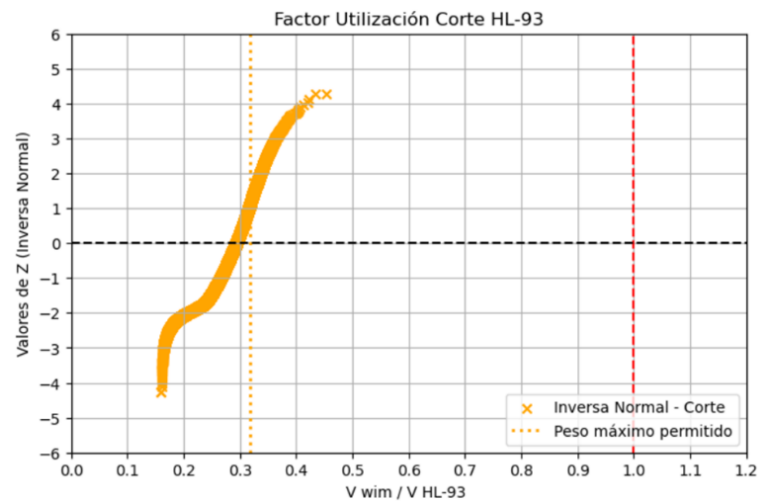


Figura A4.1.163 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 50m)

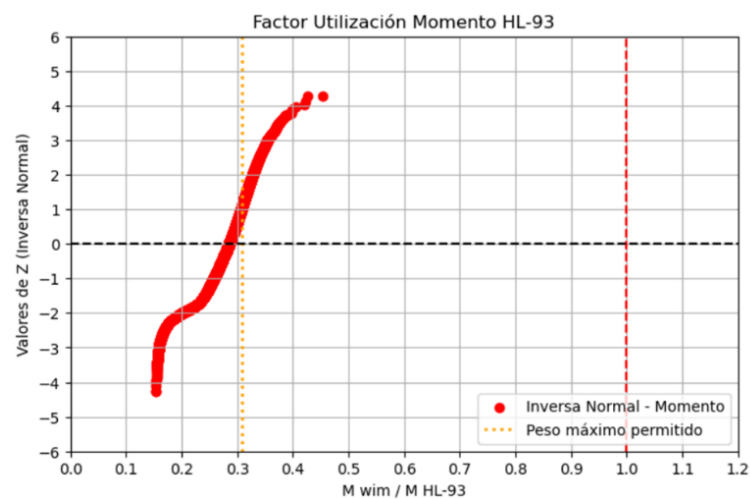


Figura A4.1.164 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 50m)

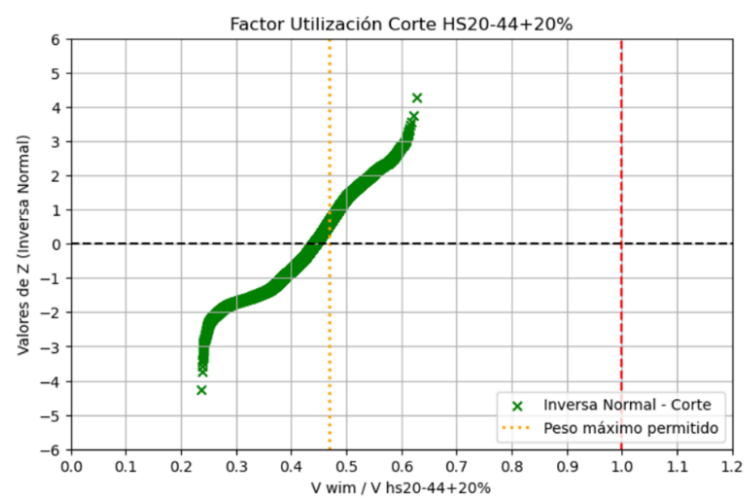


Figura A4.1.165 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 50m)

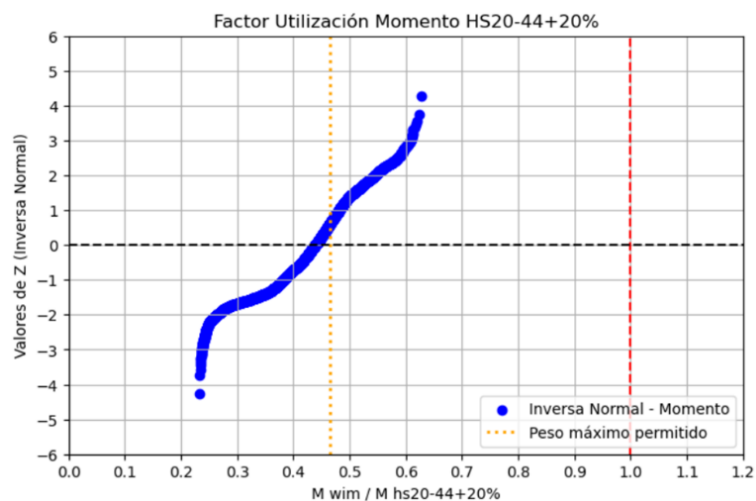


Figura A4.1.166 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 50m)

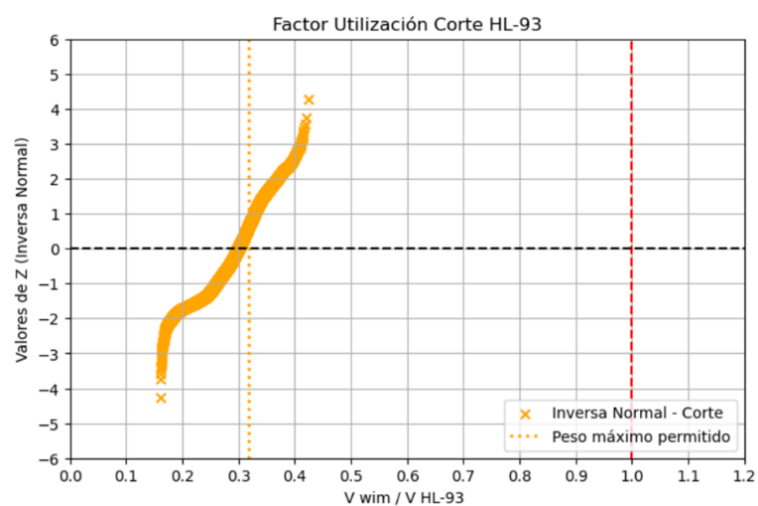


Figura A4.1.167 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 50m)

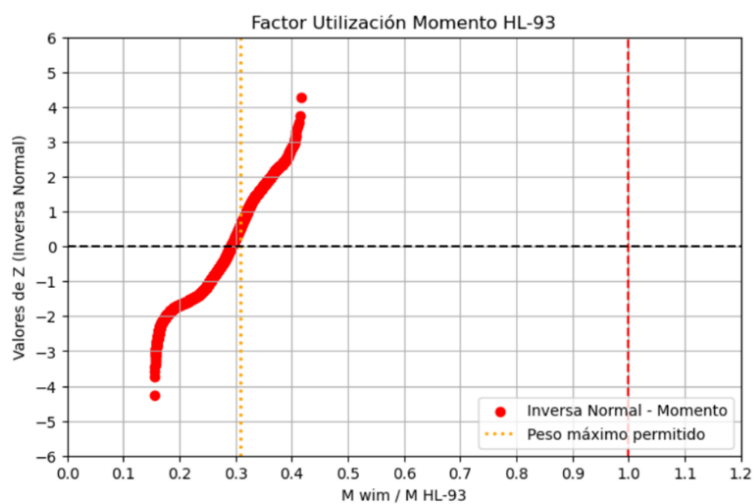


Figura A4.1.168 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 50m)

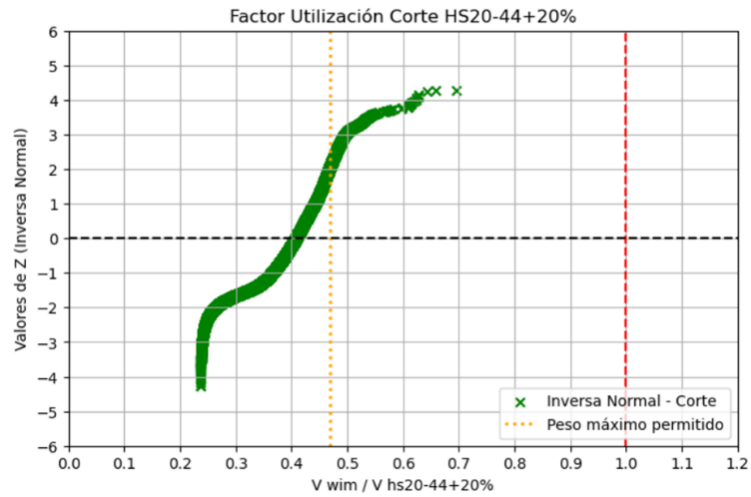


Figura A4.1.169 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 50m)

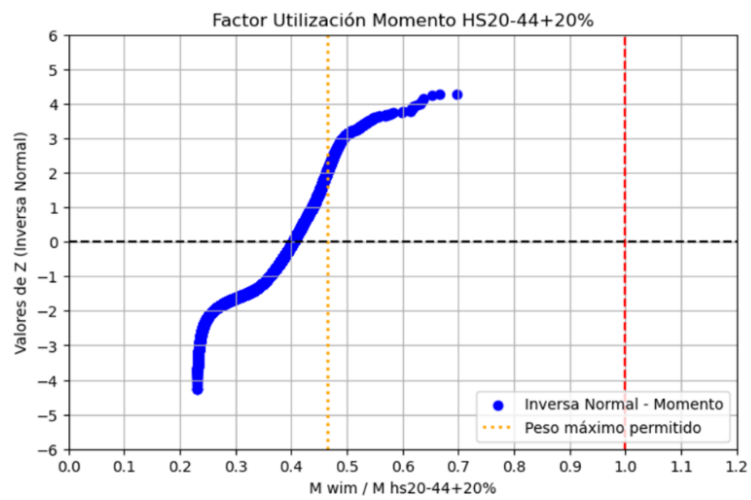


Figura A4.1.170 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 50m)

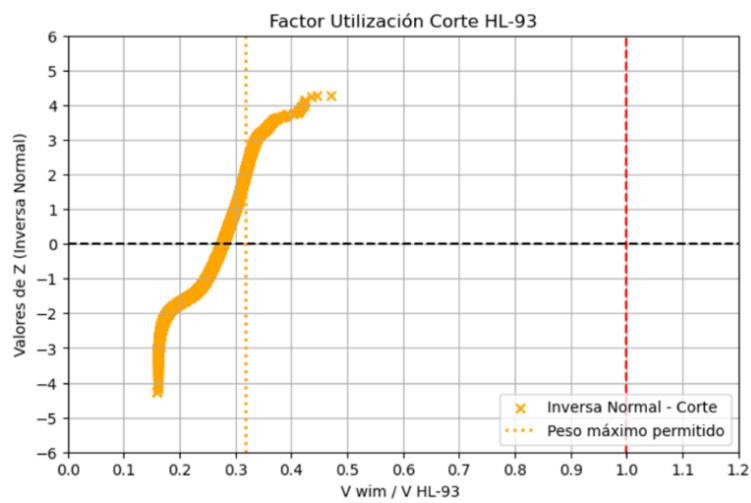


Figura A4.1.171 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 50m)

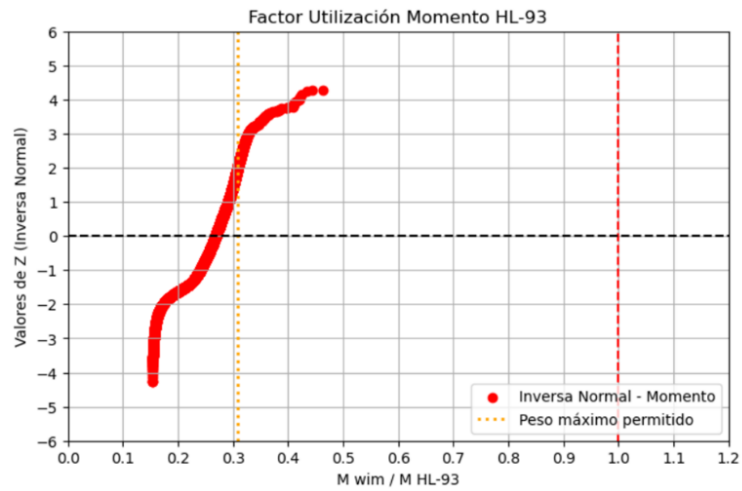


Figura A4.1.172 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 50m)

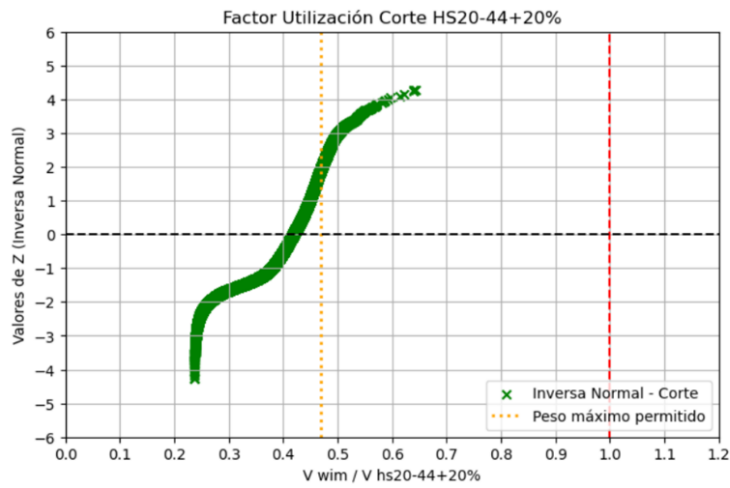


Figura A4.1.173 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 50m)

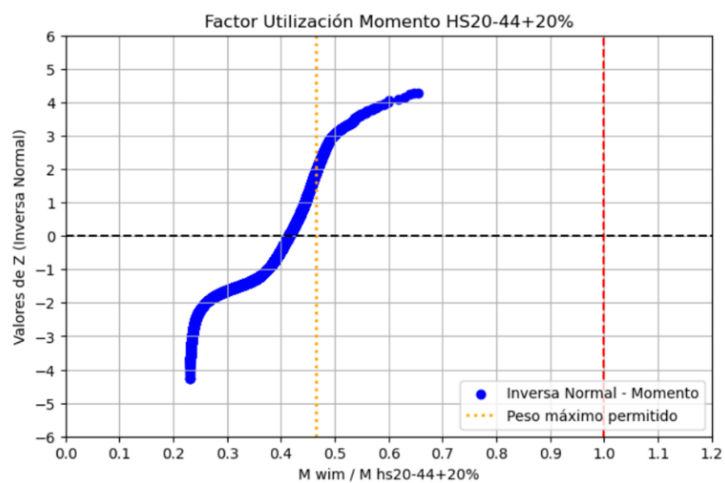


Figura A4.1.174 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 50m)

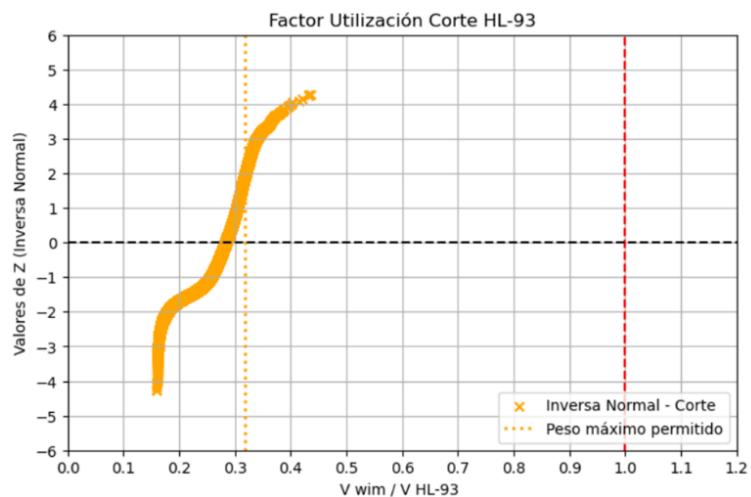


Figura A4.1.175 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 50m)

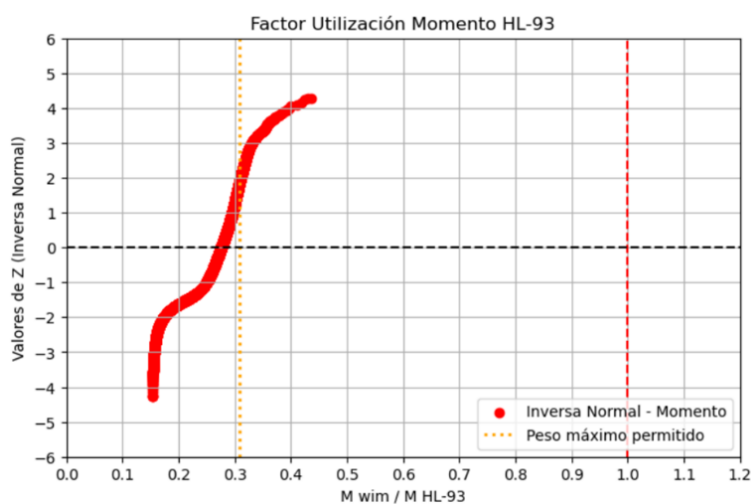


Figura A4.1.176 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 50m)

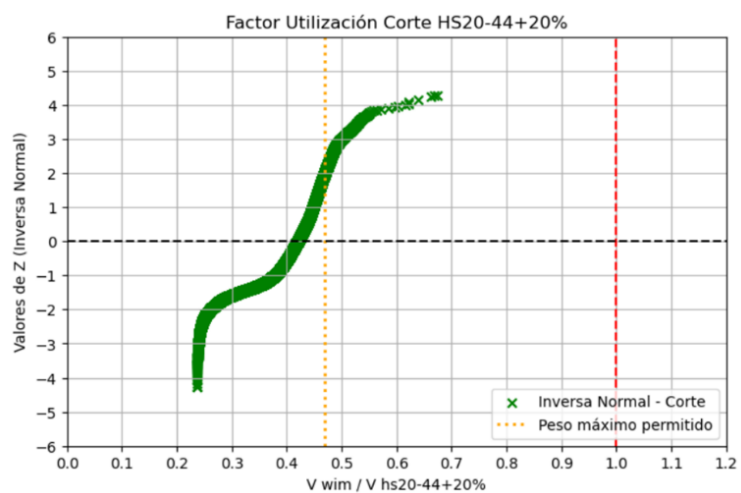


Figura A4.1.177 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 50m)

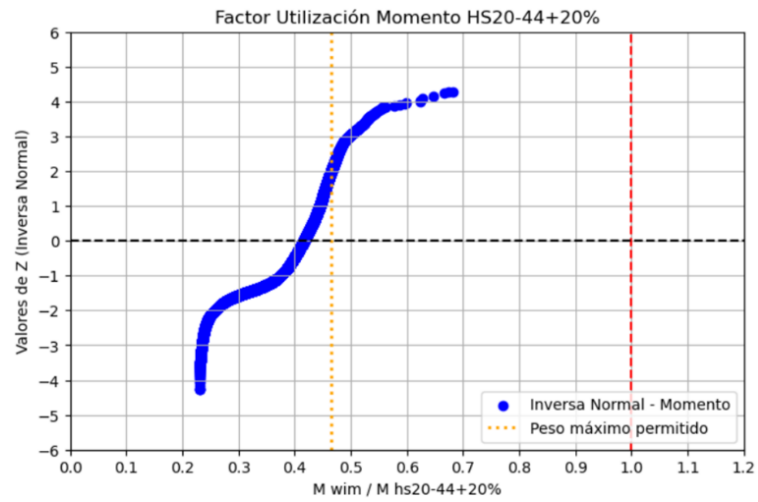


Figura A4.1.178 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 50m)

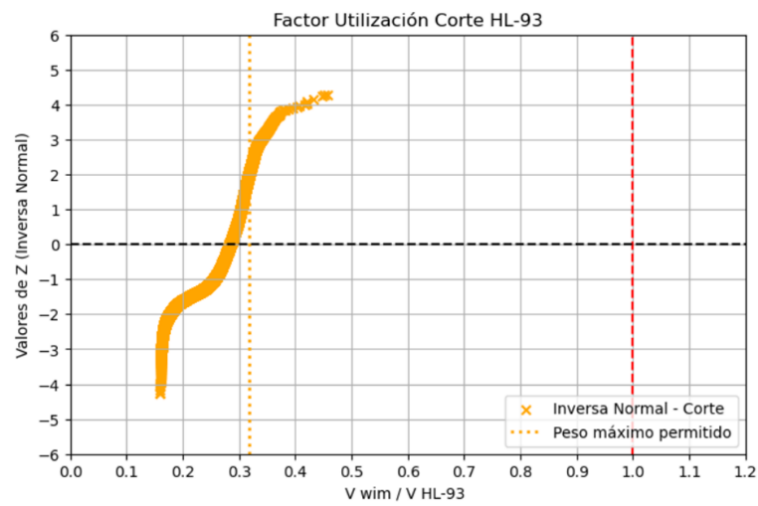


Figura A4.1.179 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 50m)

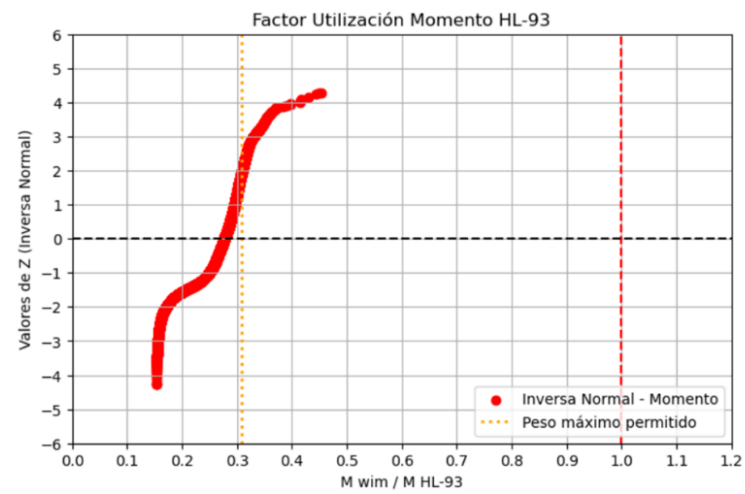


Figura A4.1.180 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 50m)

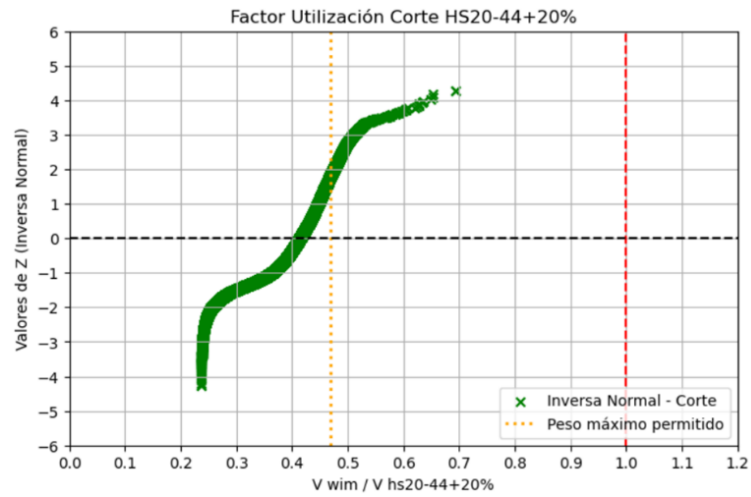


Figura A4.1.181 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 50m)

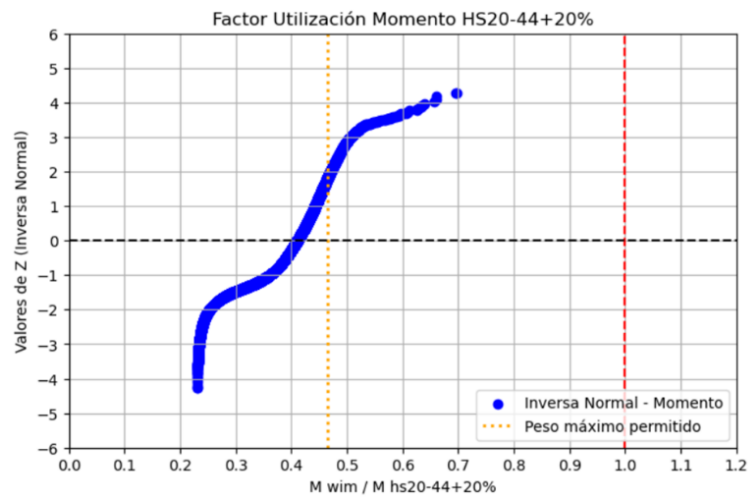


Figura A4.1.182 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 50m)

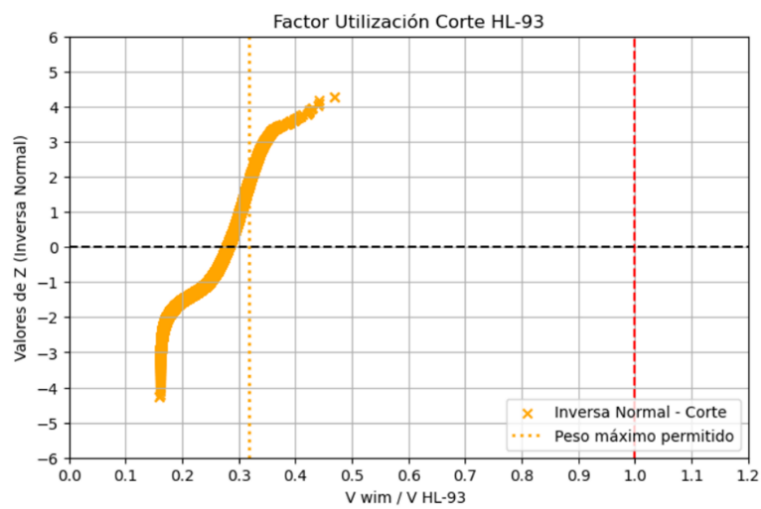


Figura A4.1.183 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 50m)

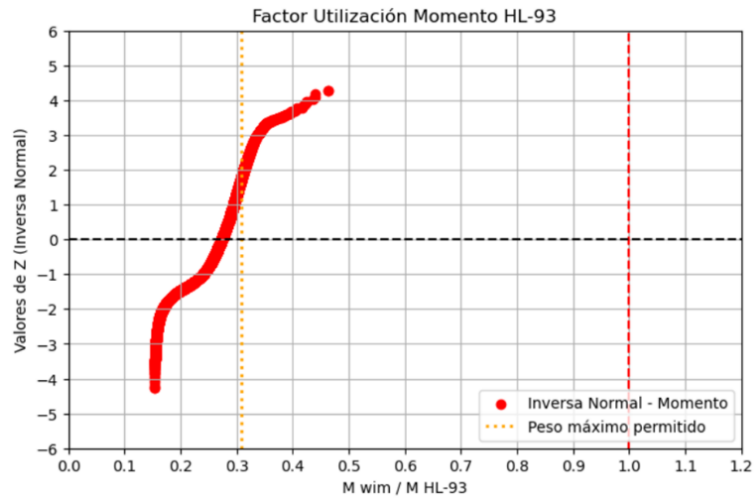


Figura A4.1.184 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 50m)

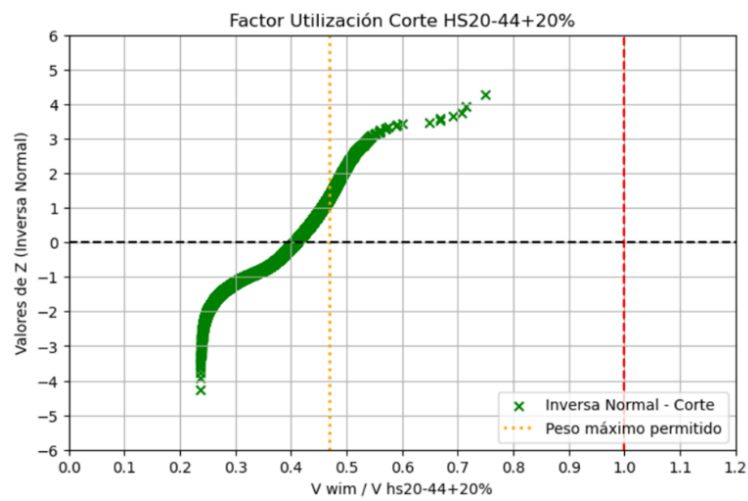


Figura A4.1.185 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 50m)

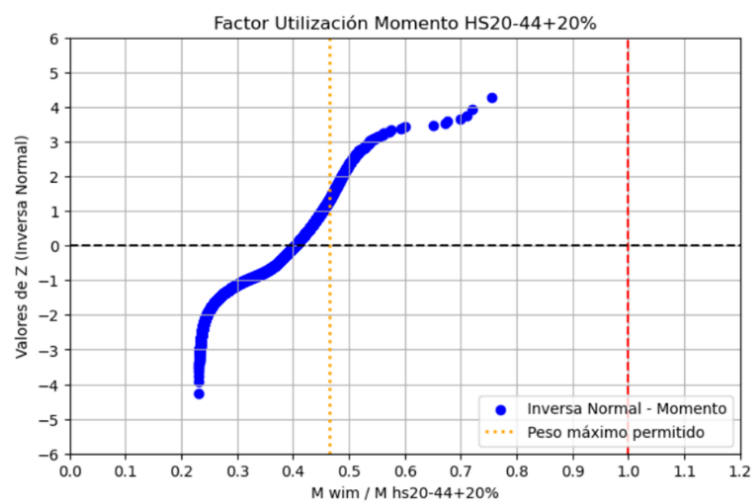


Figura A4.1.186 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 50m)

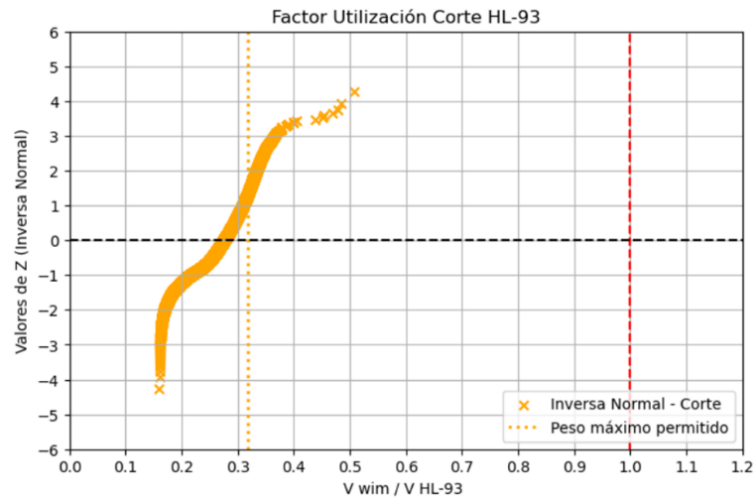


Figura A4.1.187 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 50m)

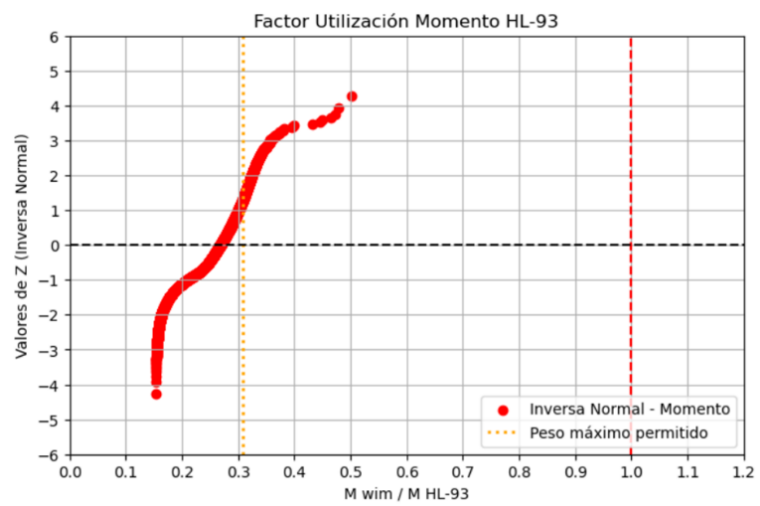


Figura A4.1.188 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 50m)

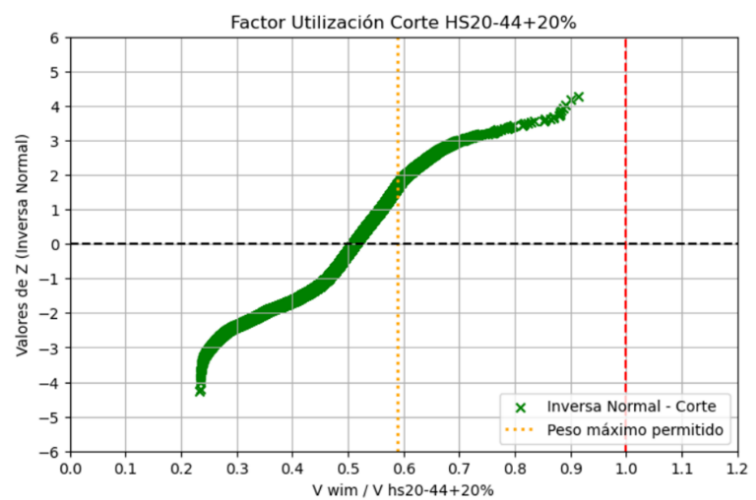


Figura A4.1.189 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 50m)

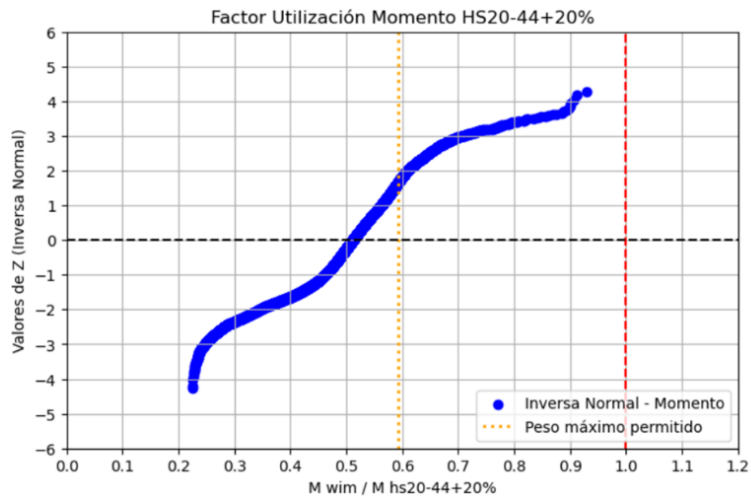


Figura A4.1.190 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 50m)

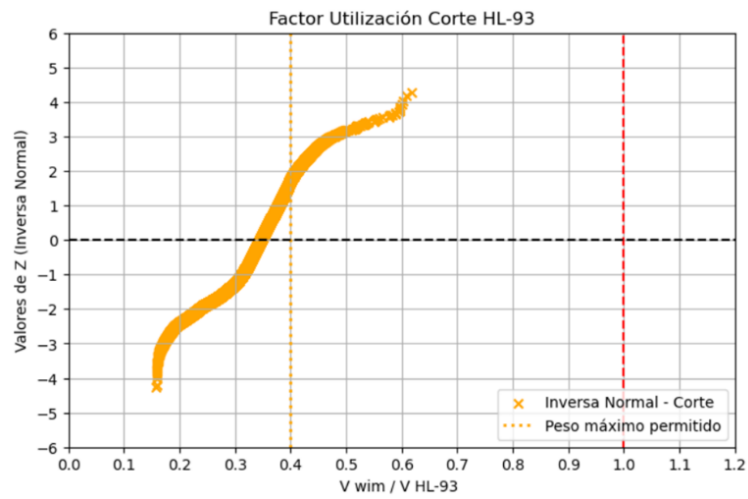


Figura A4.1.191 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 50m)

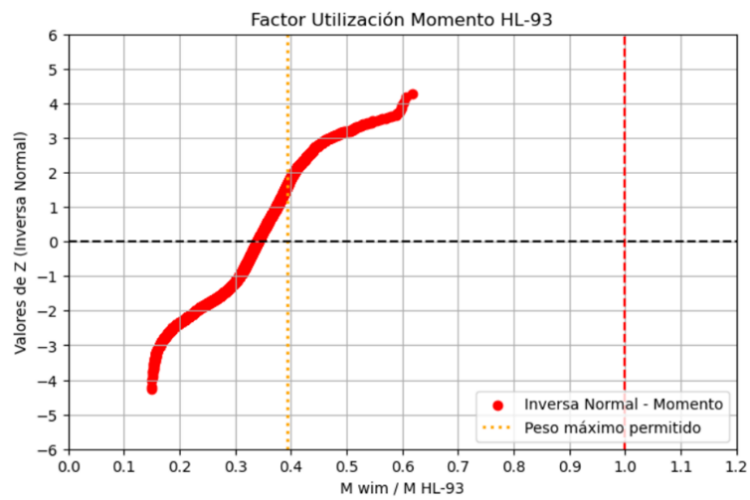


Figura A4.1.192 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 50m)

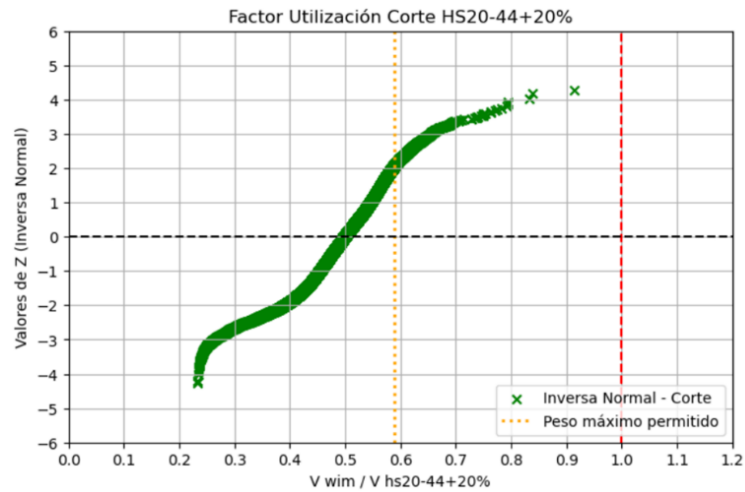


Figura A4.1.193 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 50m)

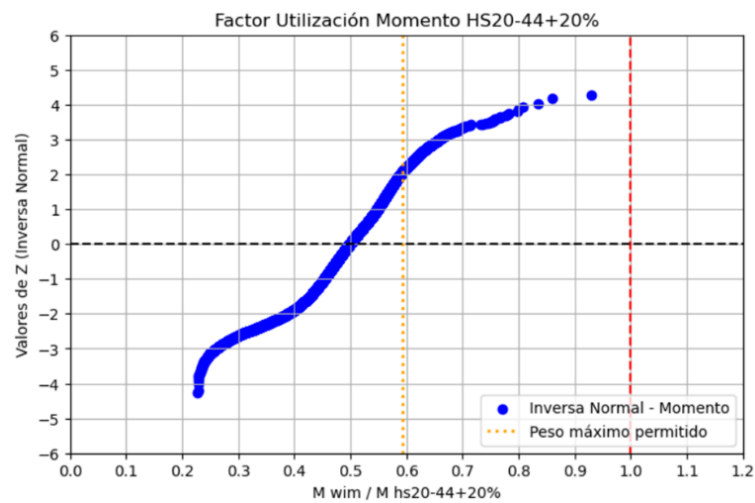


Figura A4.1.194 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 50m)

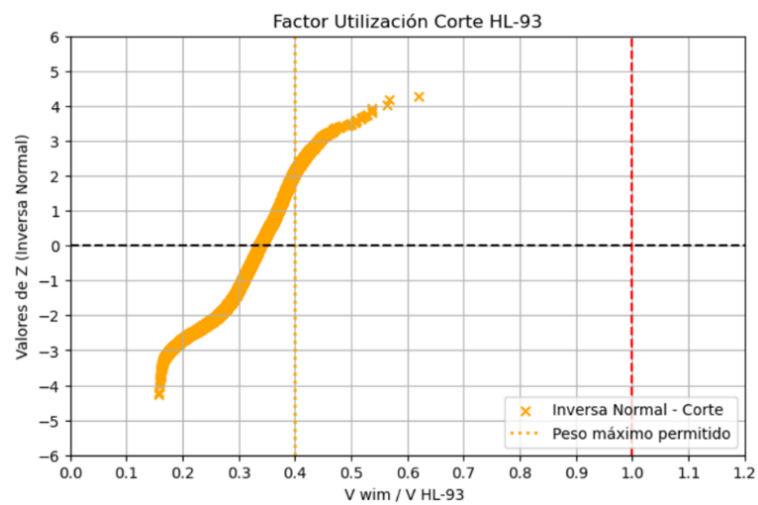


Figura A4.1.195 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 50m)

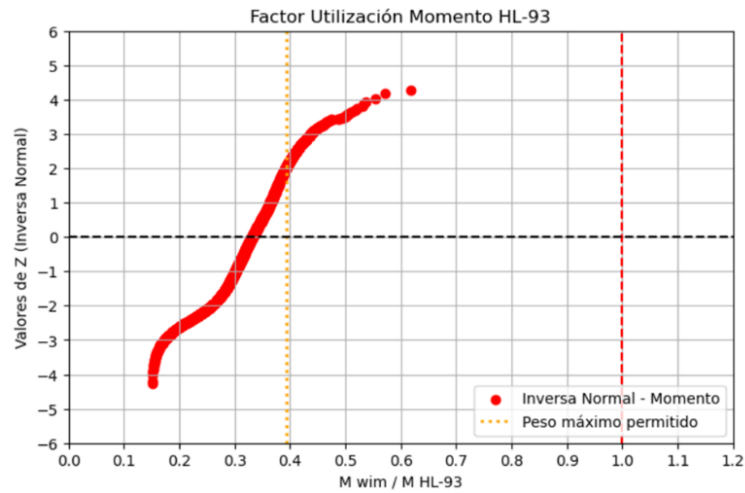


Figura A4.1.196 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 50m)

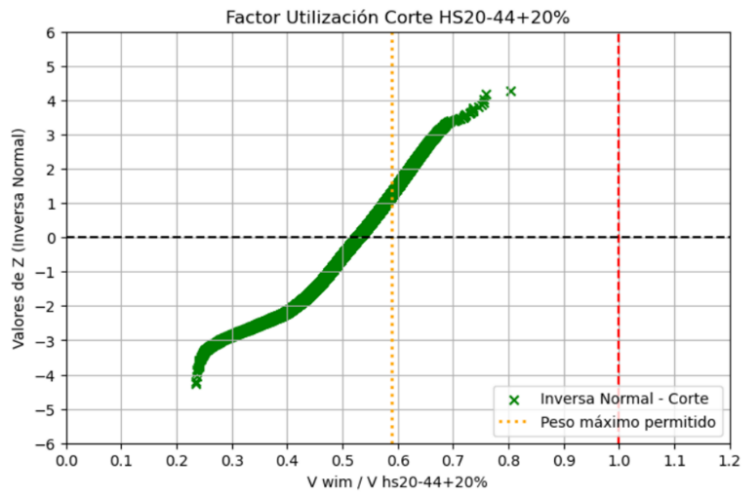


Figura A4.1.197 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 50m)

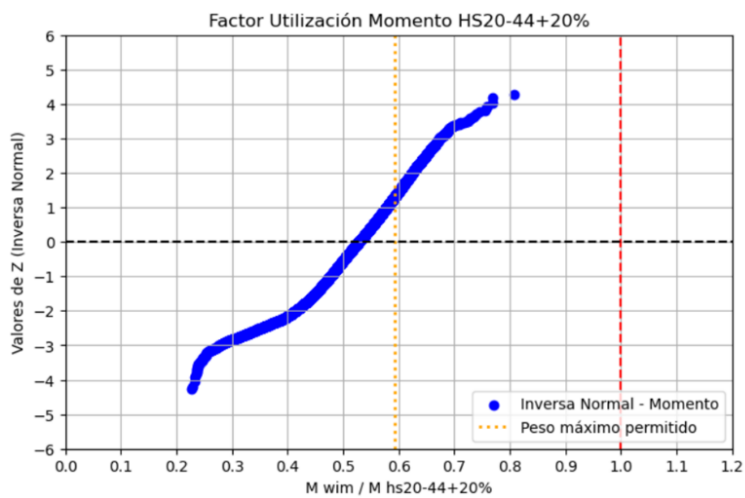


Figura A4.1.198 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 50m)

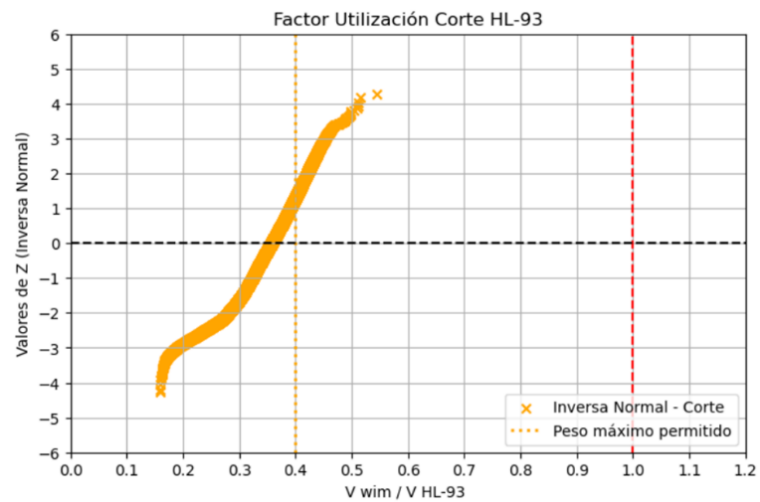


Figura A4.1.199 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 50m)

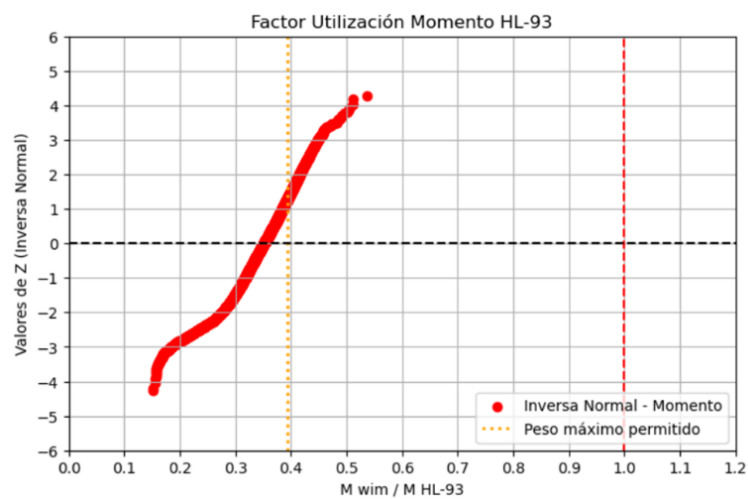


Figura A4.1.200 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 50m)

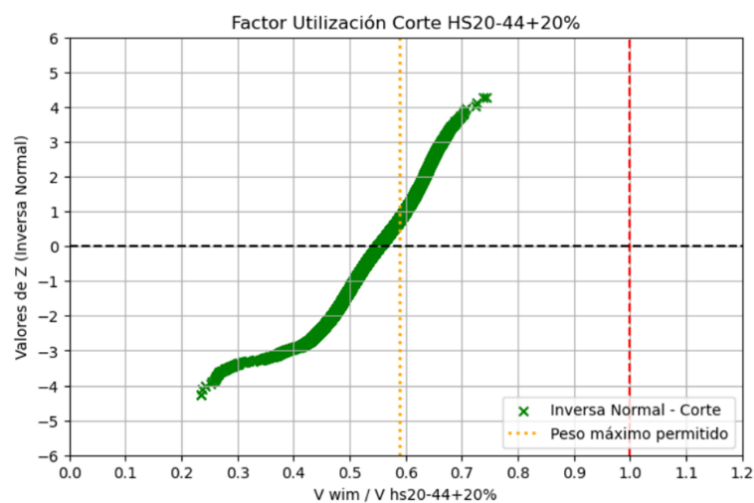


Figura A4.1.201 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 50m)

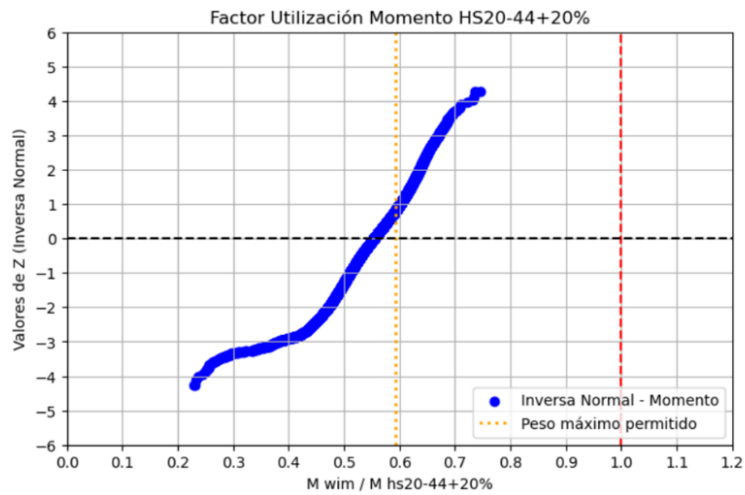


Figura A4.1.202 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 50m)

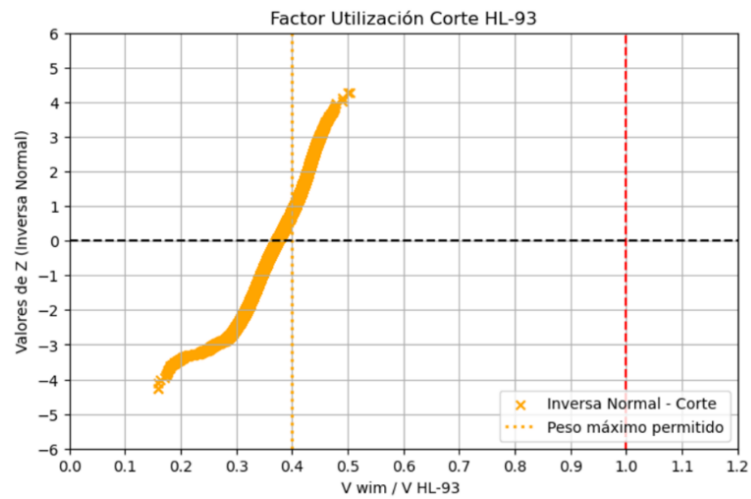


Figura A4.1.203 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 50m)

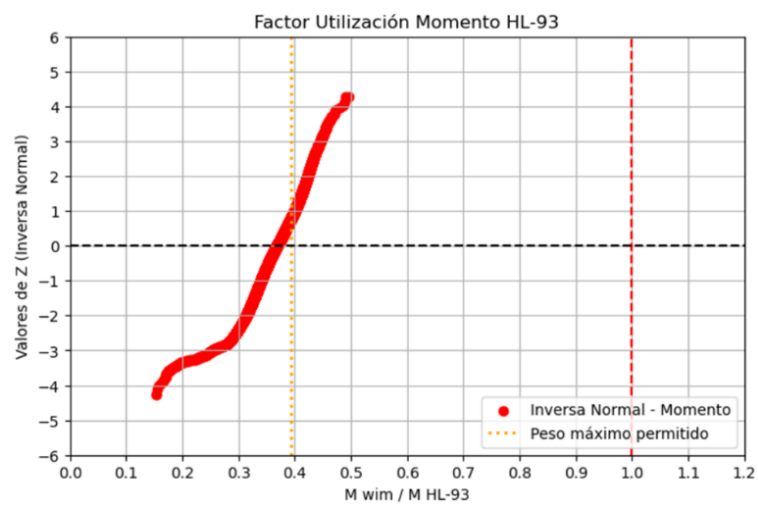


Figura A4.1.204 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 50m)

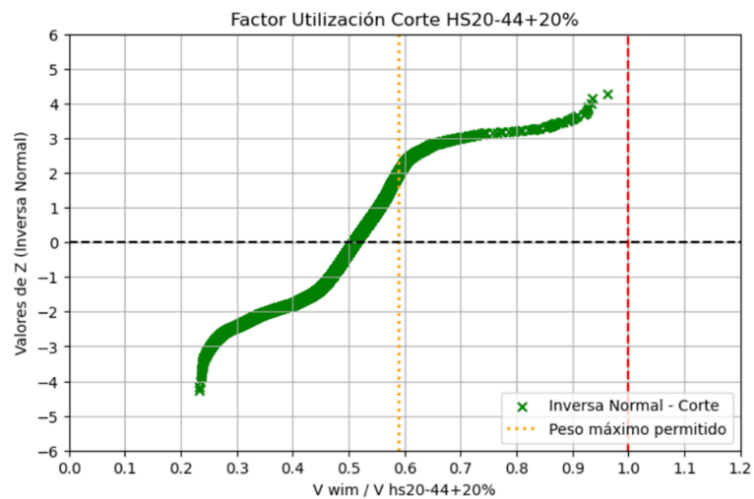


Figura A4.1.205 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 50m)

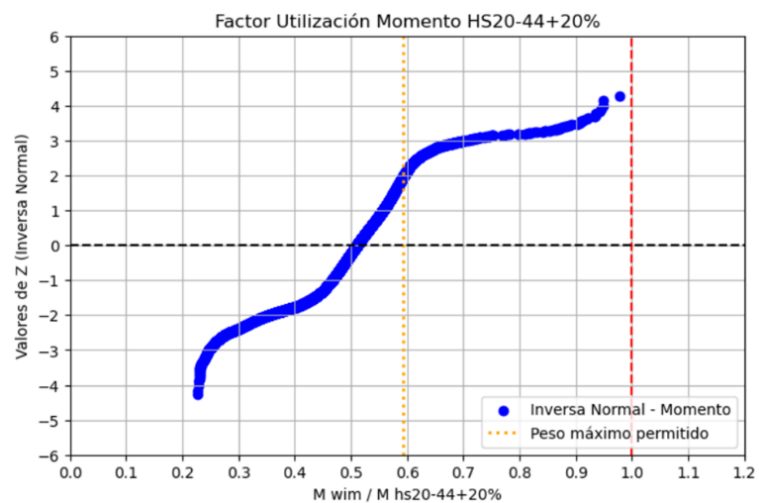


Figura A4.1.206 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 50m)

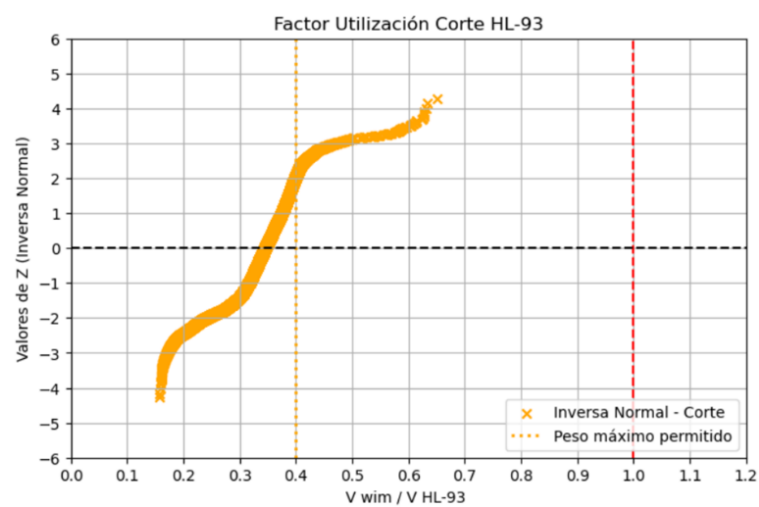


Figura A4.1.207 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 50m)

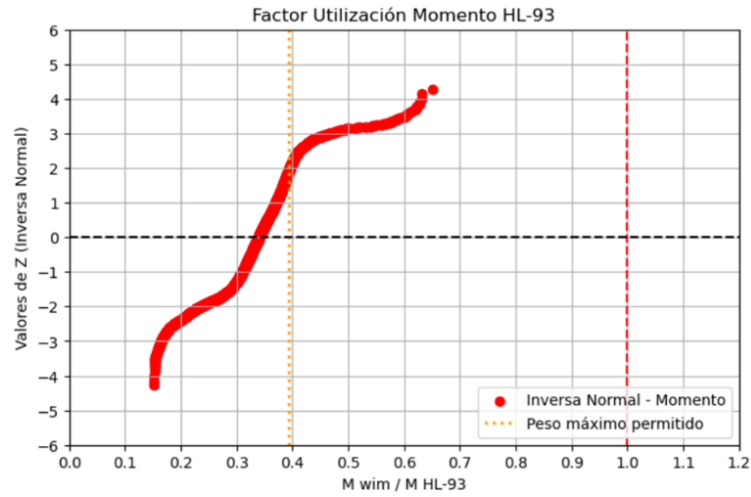


Figura A4.1.208 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 50m)

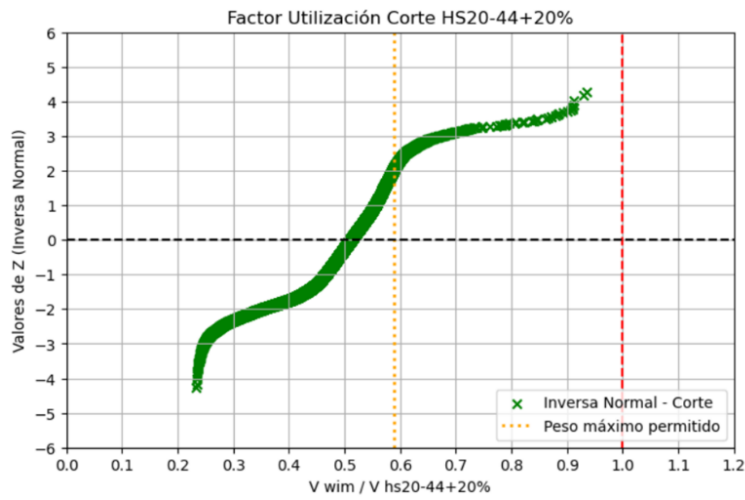


Figura A4.1.209 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 50m)

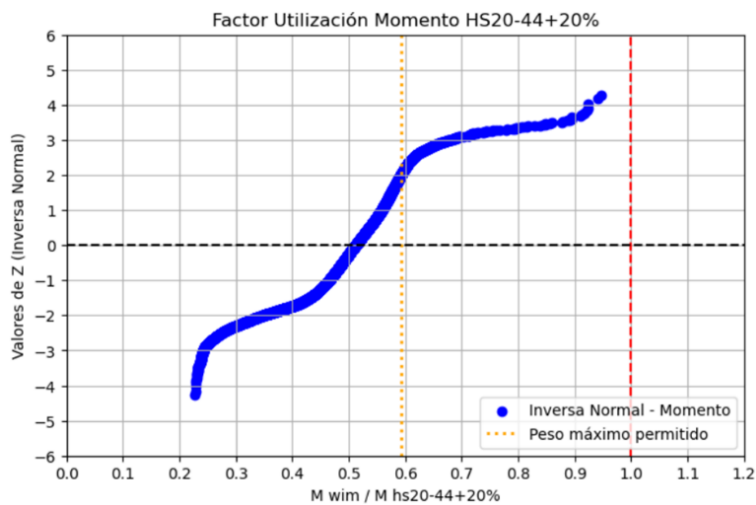


Figura A4.1.210 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 50m)

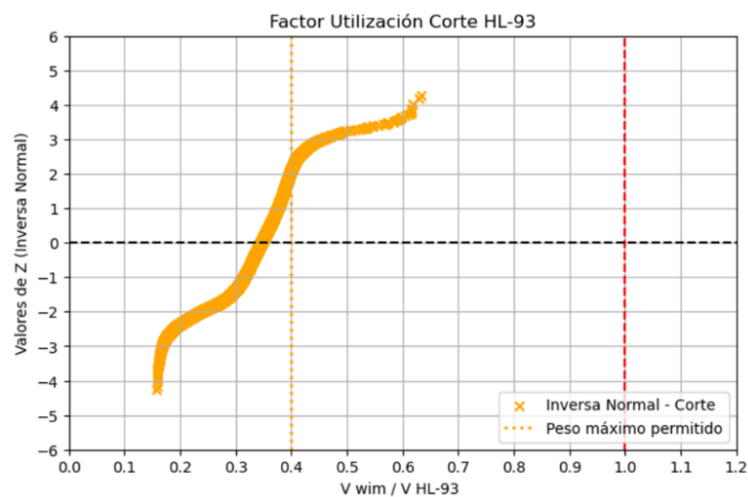


Figura A4.1.211 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 50m)

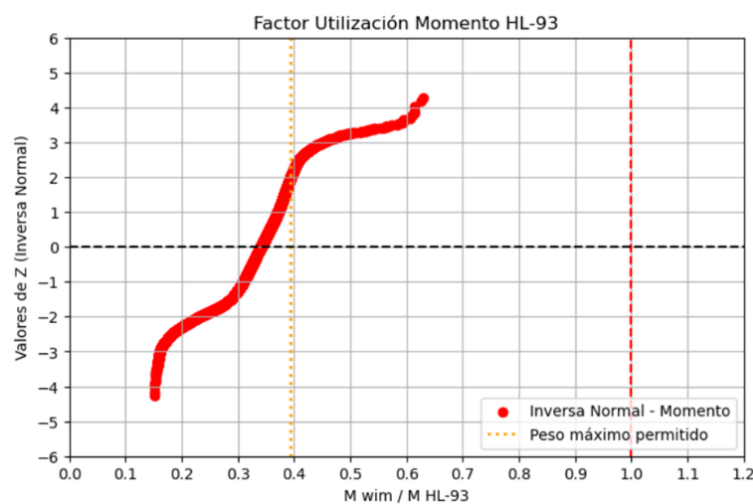


Figura A4.1.212 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 50m)

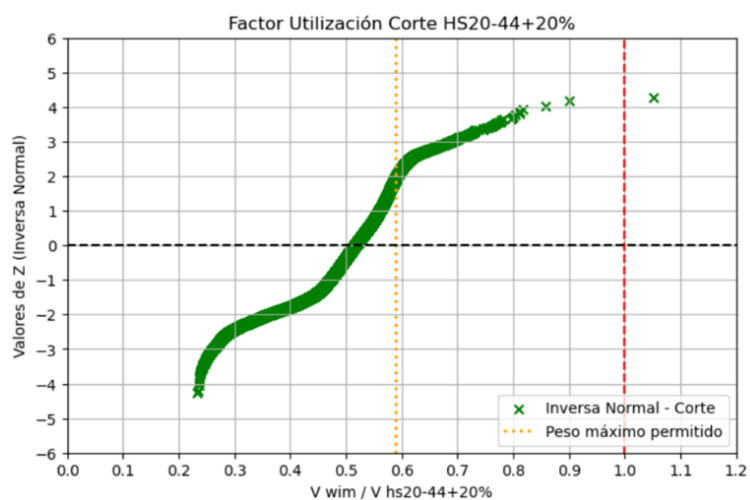


Figura A4.1.213 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 50m)

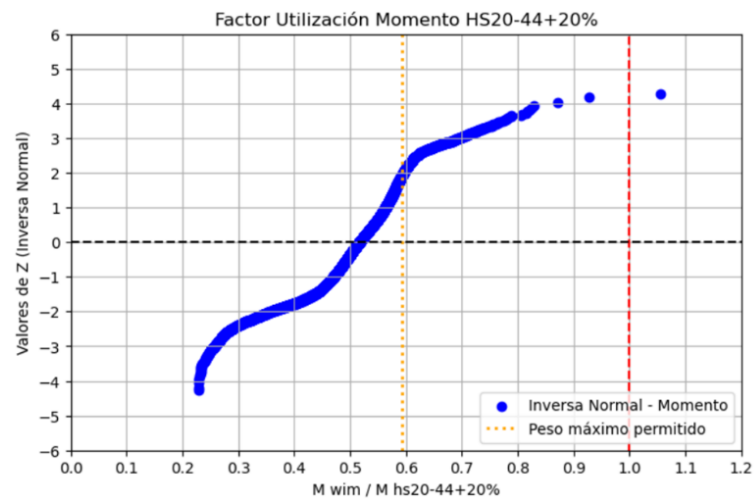


Figura A4.1.214 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 50m)

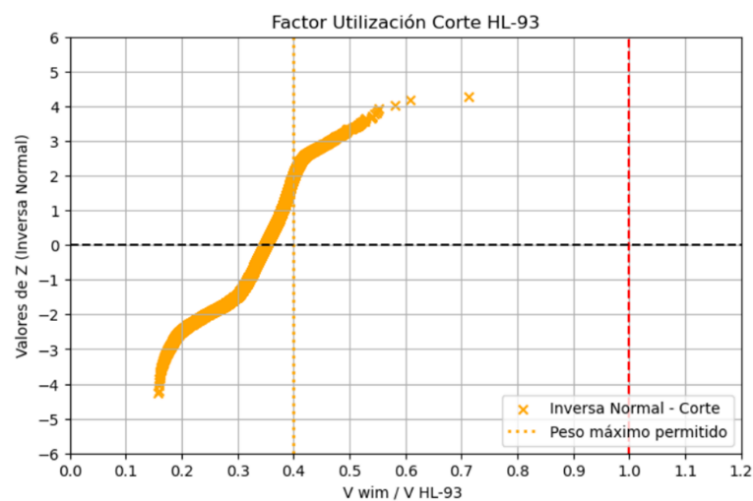


Figura A4.1.215 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 50m)

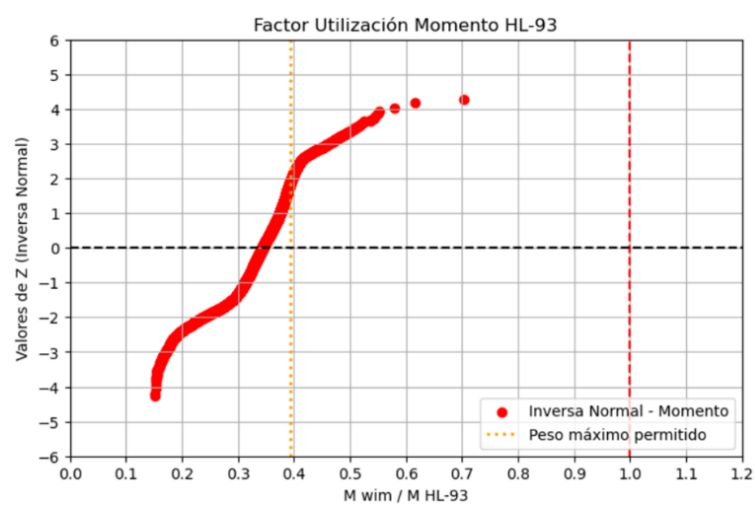


Figura A4.1.216 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 50m)

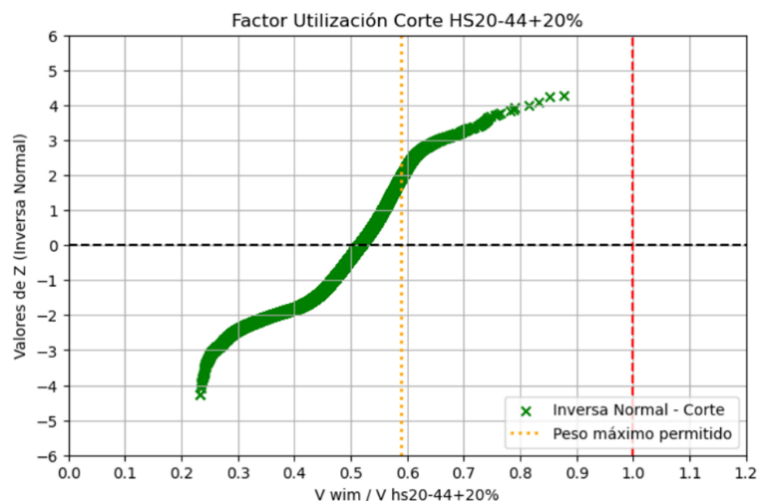


Figura A4.1.217 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 50m)

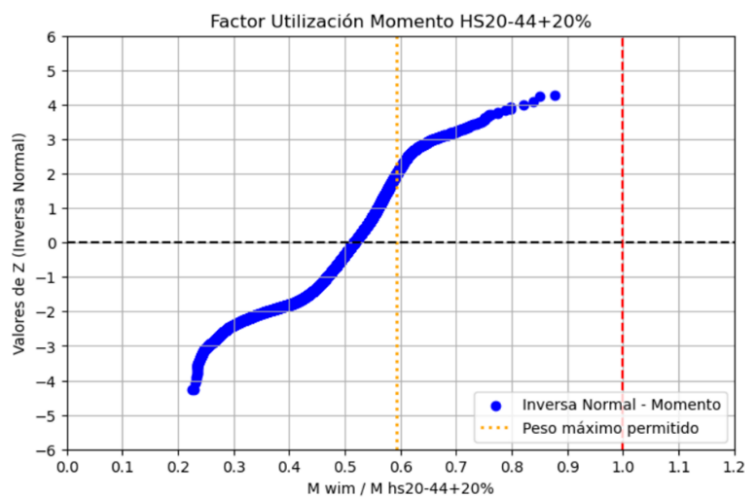


Figura A4.1.218 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 50m)

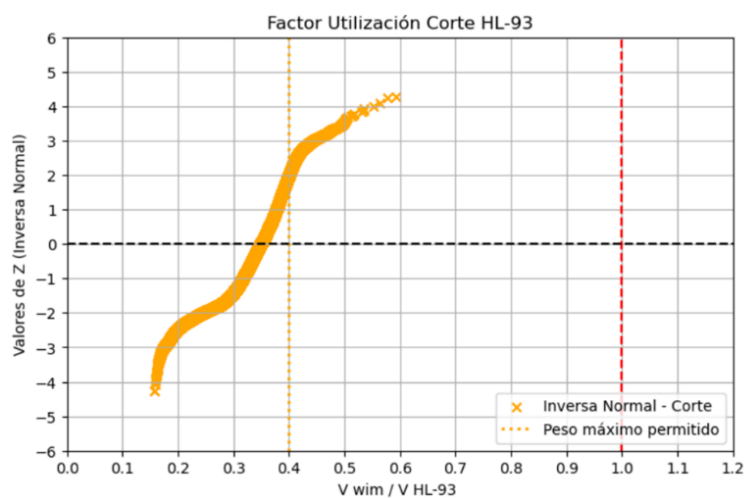


Figura A4.1.219 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 50m)

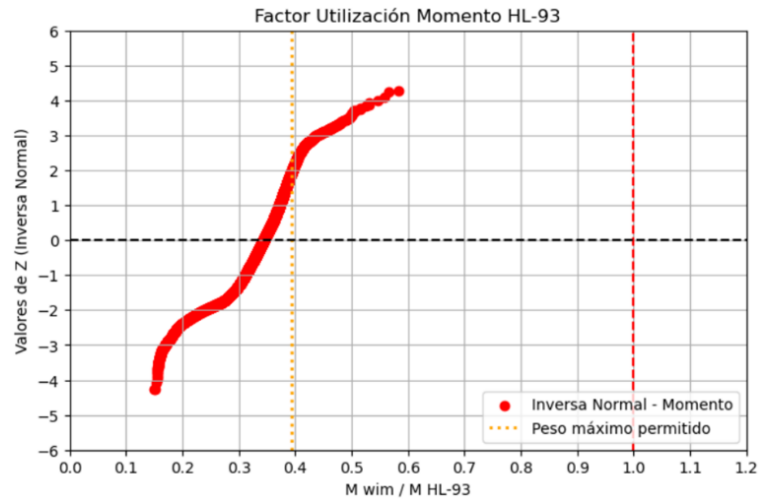


Figura A4.1.220 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 50m)

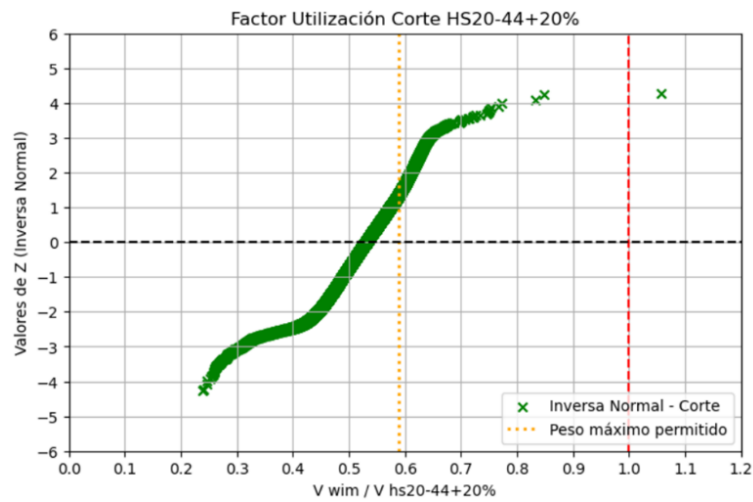


Figura A4.1.221 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 50m)

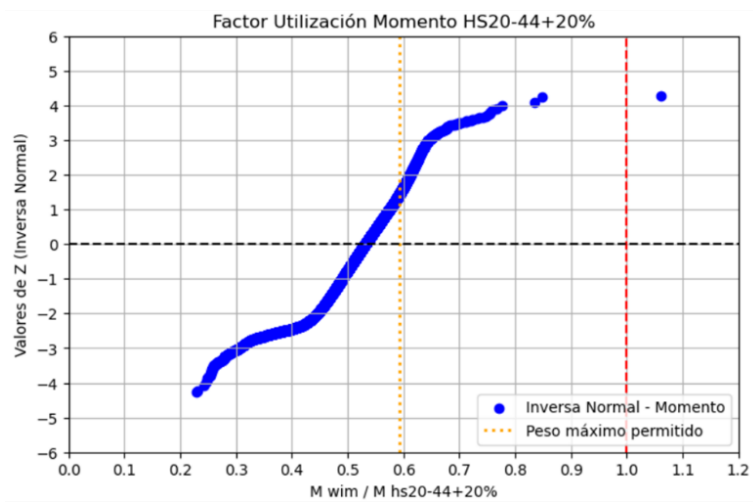


Figura A4.1.222 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 50m)

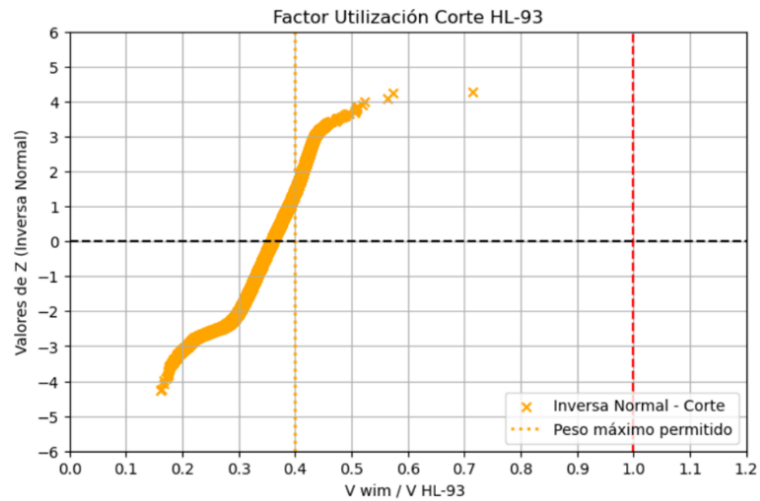


Figura A4.1.223 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 50m)

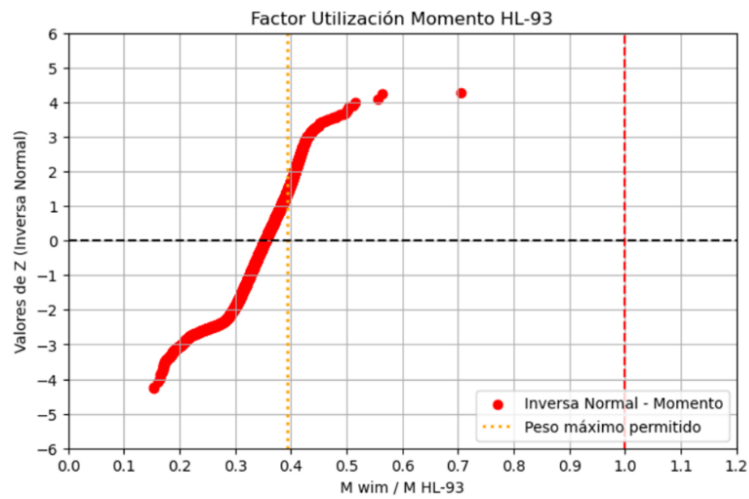


Figura A4.1.224 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 50m)

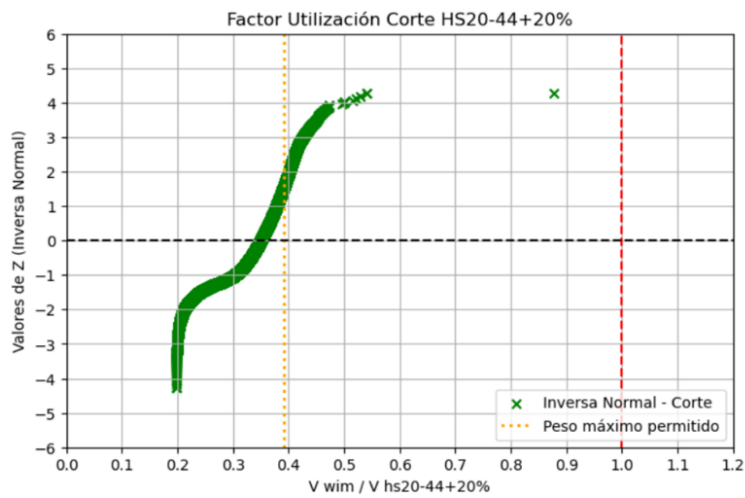


Figura A4.1.225 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 70m)

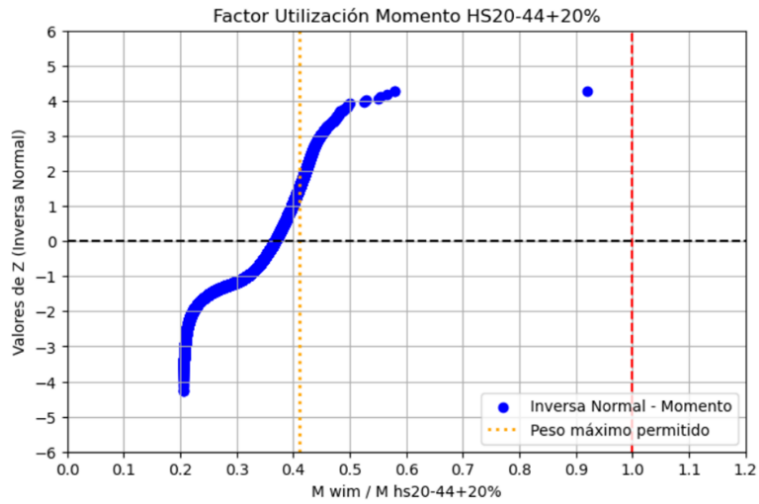


Figura A4.1.226 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 70m)

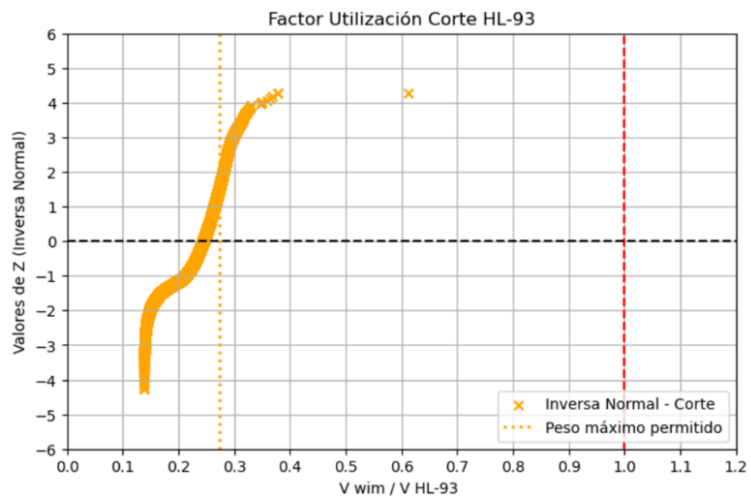


Figura A4.1.227 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 70m)

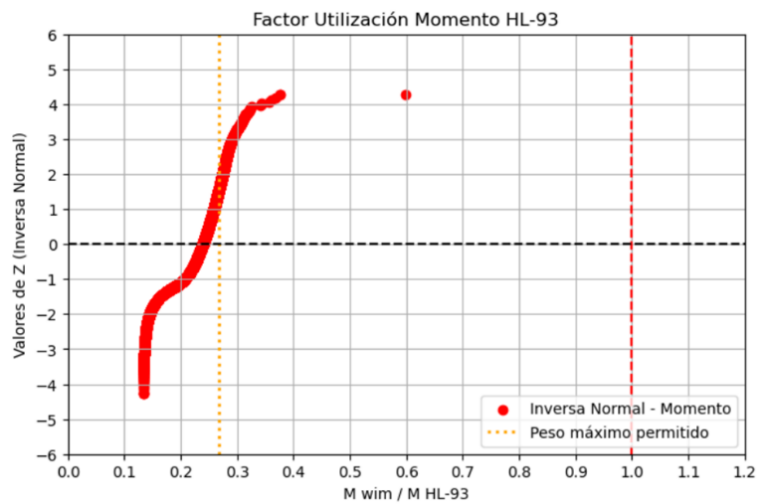


Figura A4.1.228 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 70m)

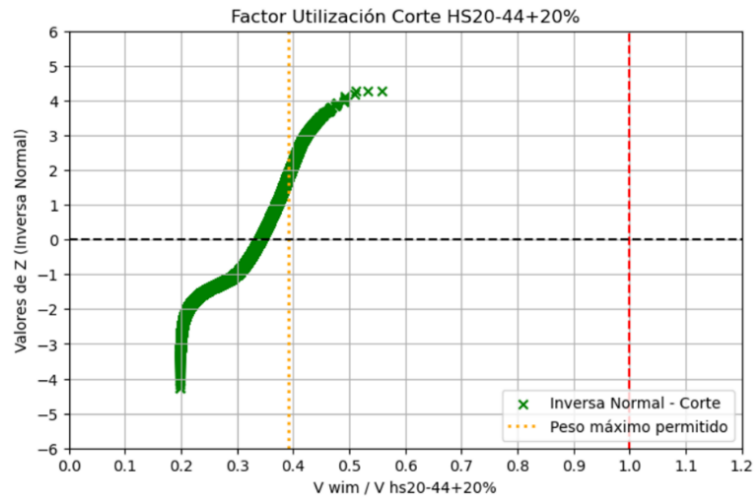


Figura A4.1.229 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 70m)

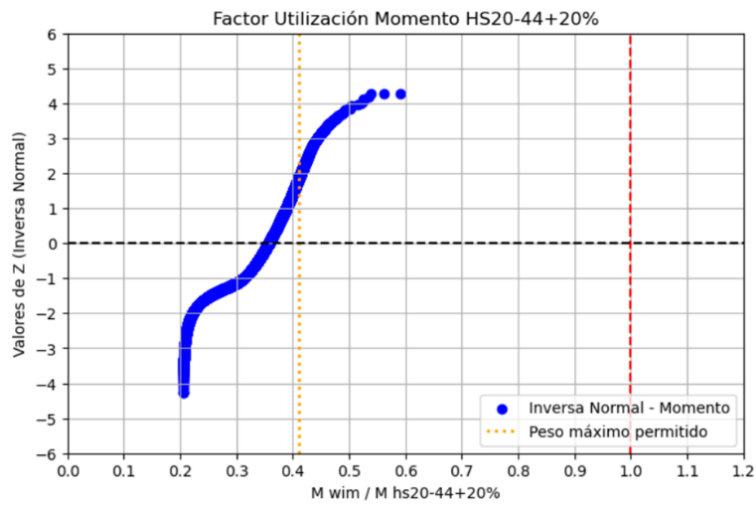


Figura A4.1.230 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2017, vano 70m)

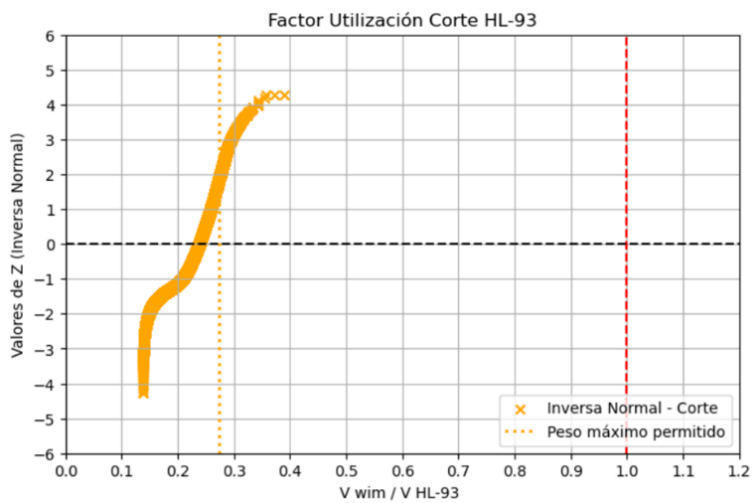


Figura A4.1.231 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 70m)

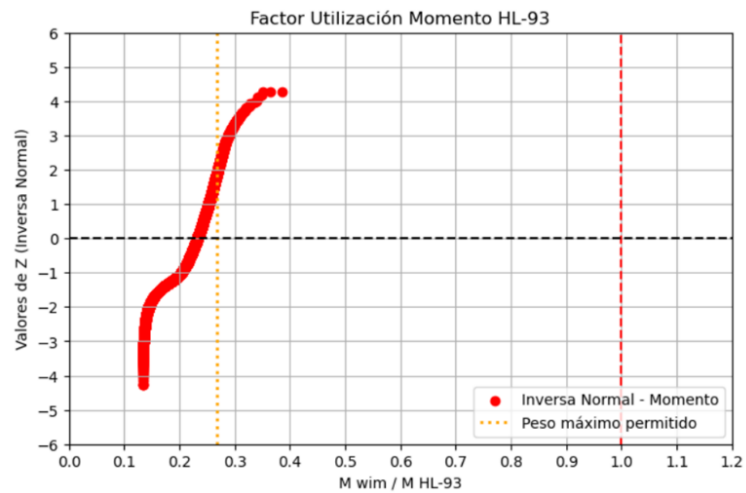


Figura A4.1.232 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2017, vano 70m)

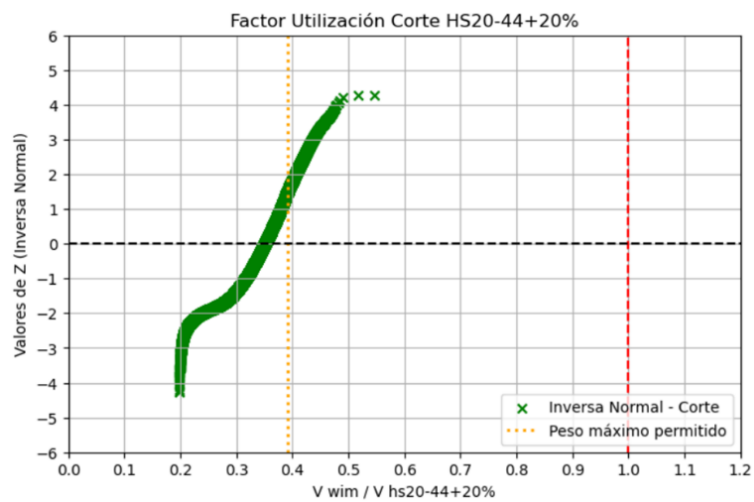


Figura A4.1.233 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 70m)

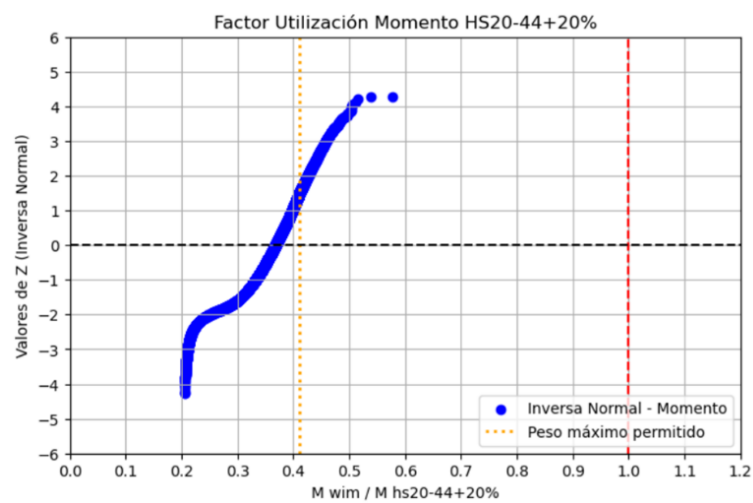


Figura A4.1.234 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 70m)

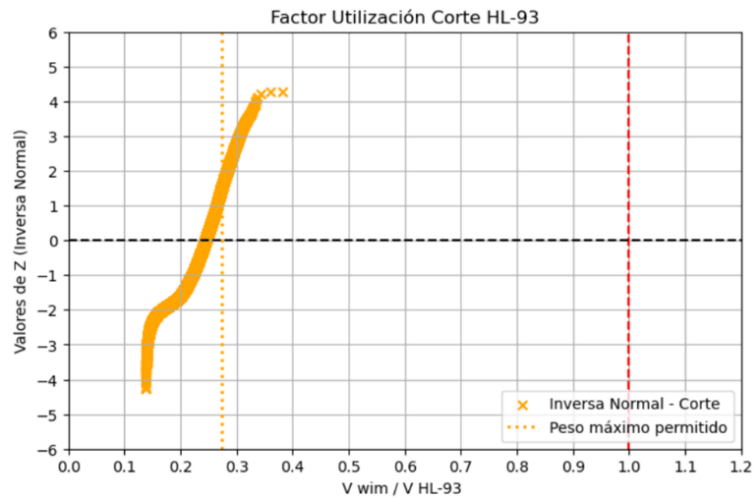


Figura A4.1.235 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 70m)

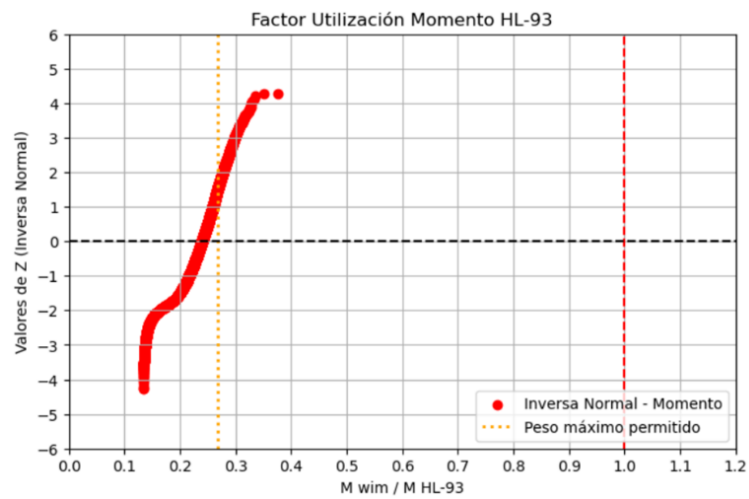


Figura A4.1.236 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 70m)

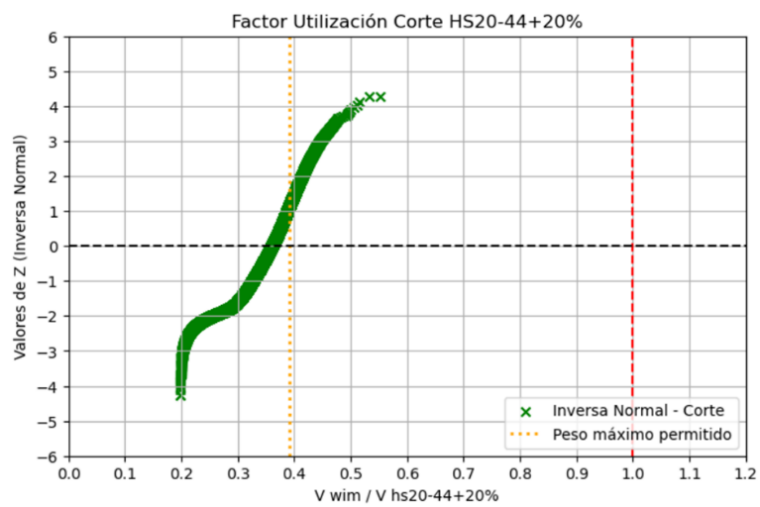


Figura A4.1.237 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 70m)

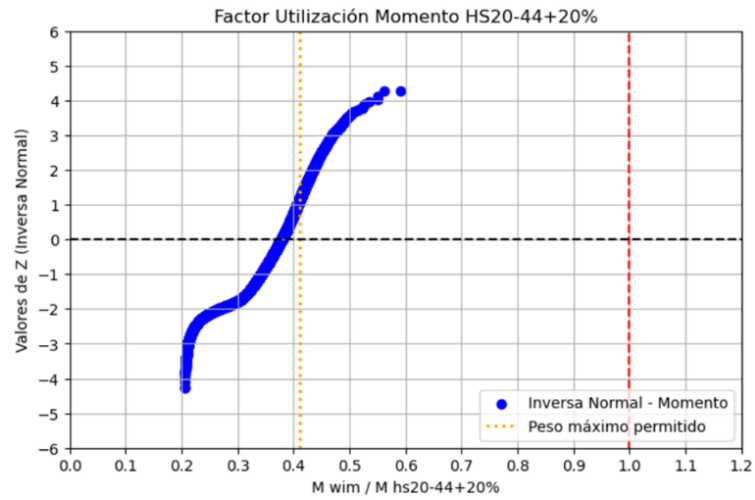


Figura A4.1.238 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 70m)

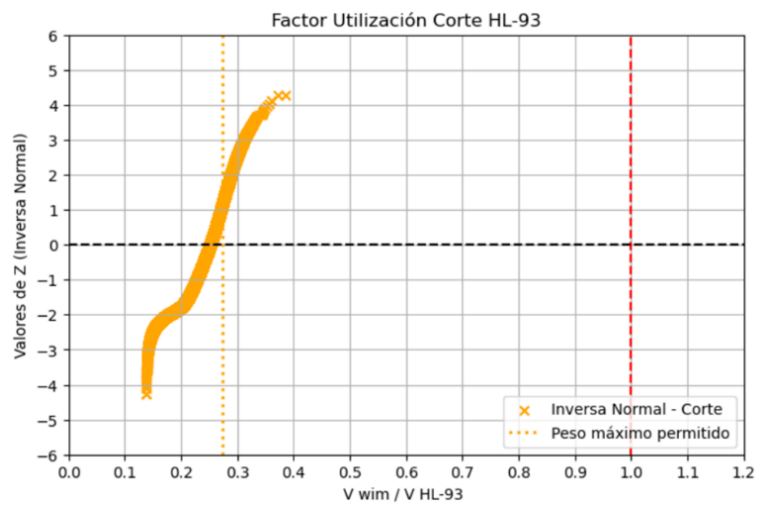


Figura A4.1.239 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 70m)

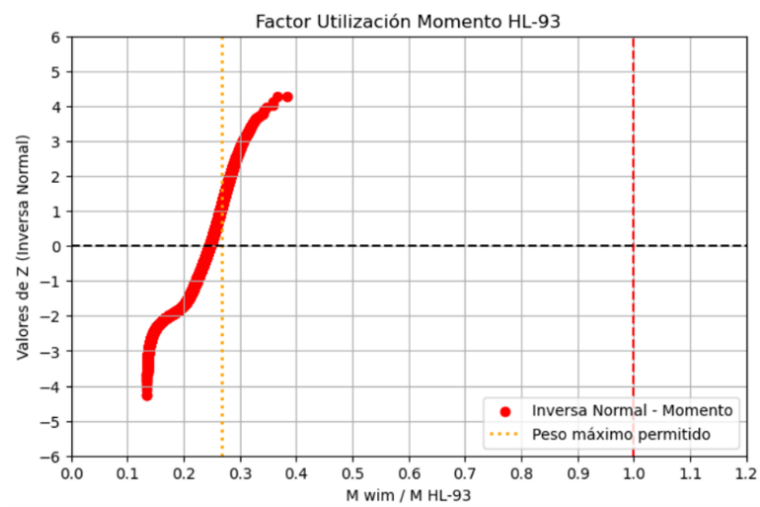


Figura A4.1.240 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 70m)

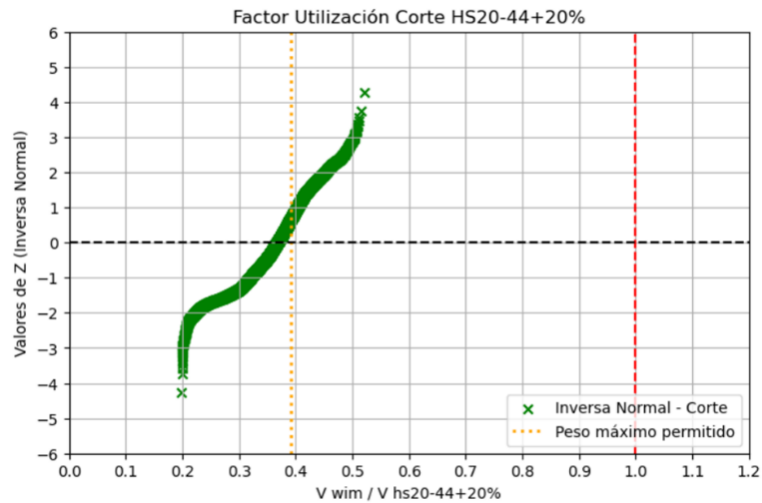


Figura A4.1.241 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 70m)

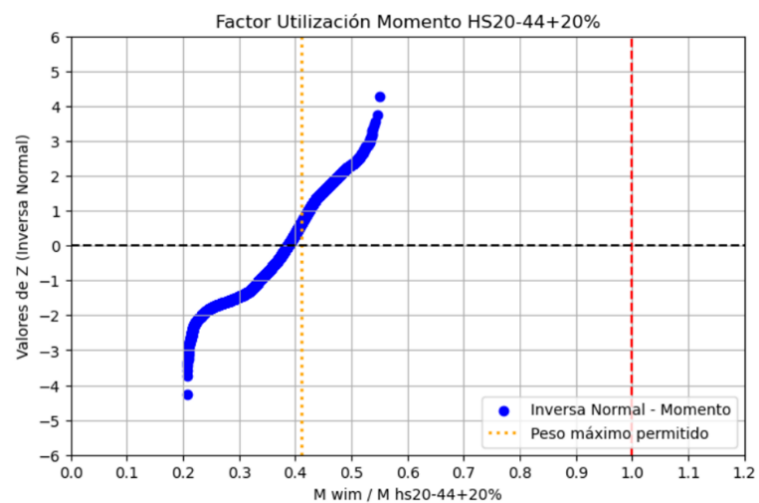


Figura A4.1.242 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 70m)

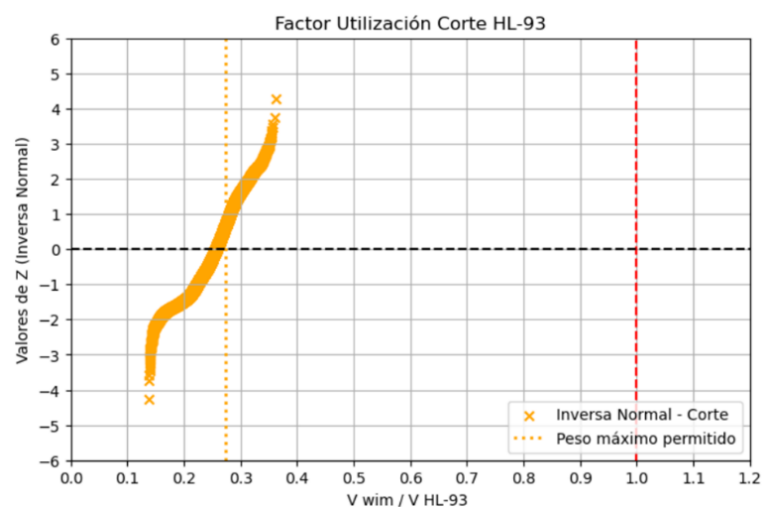


Figura A4.1.243 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 70m)

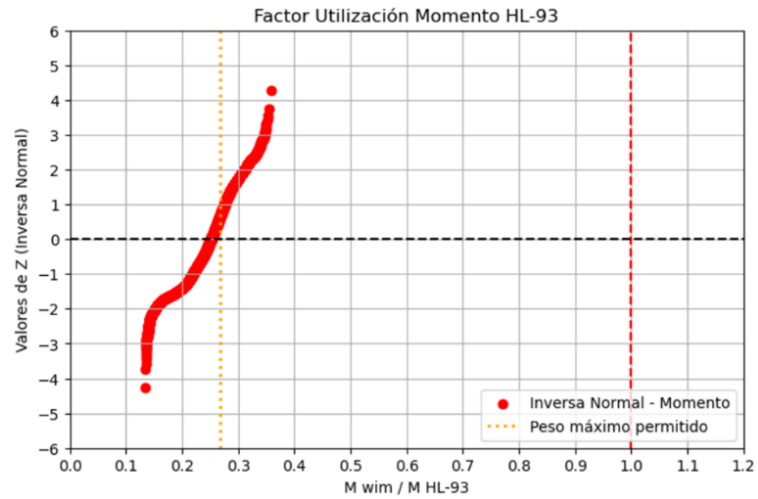


Figura A4.1.244 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 70m)

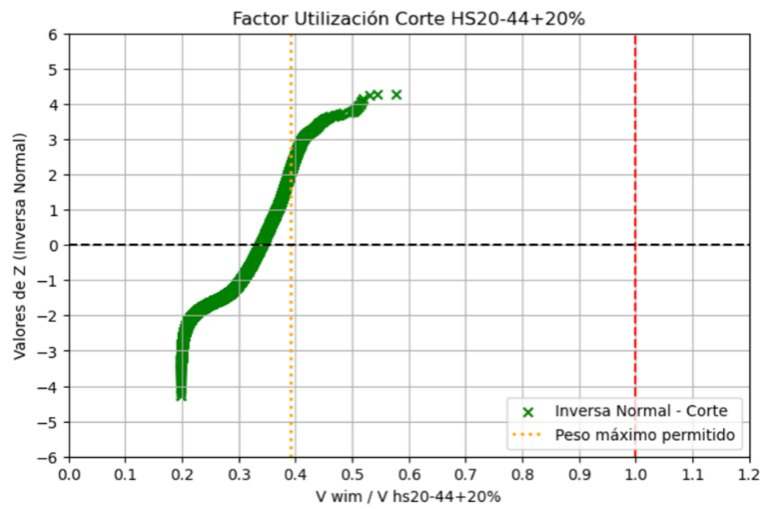


Figura A4.1.245 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 70m)

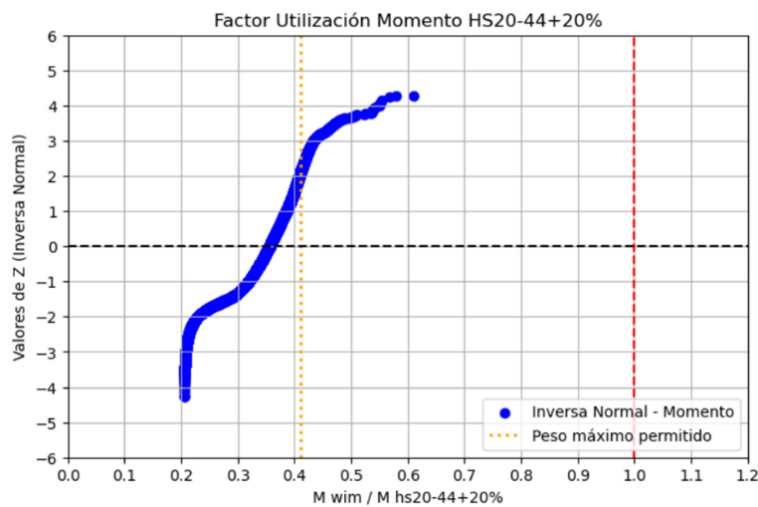


Figura A4.1.246 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 70m)

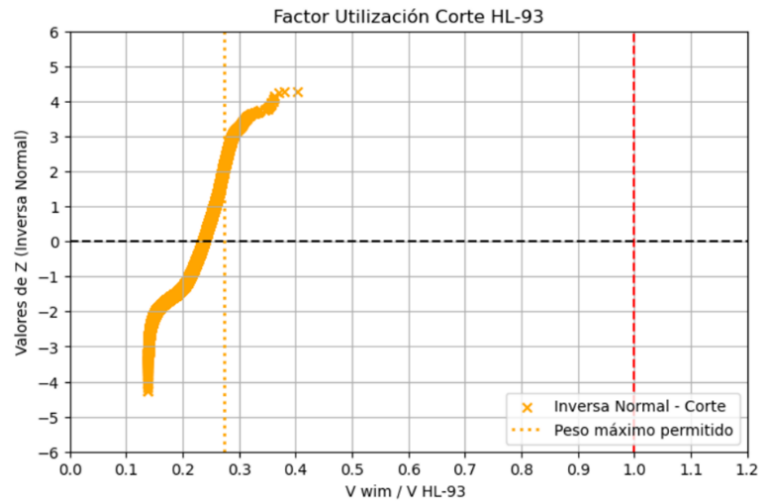


Figura A4.1.247 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 70m)

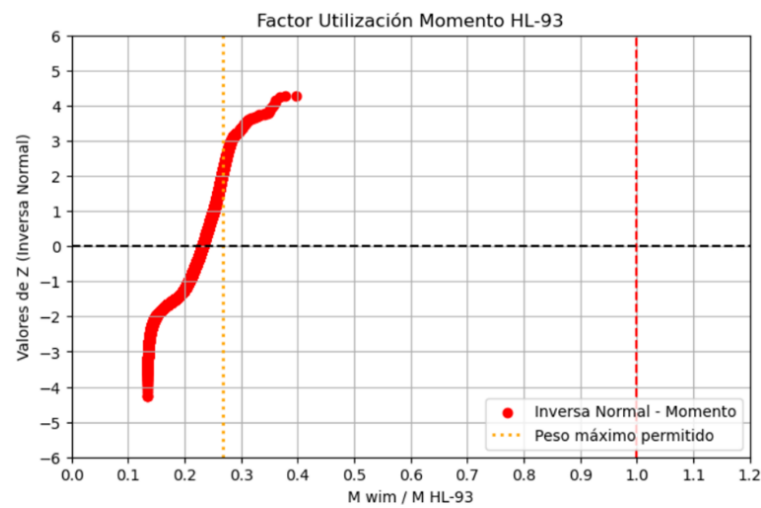


Figura A4.1.248 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 70m)

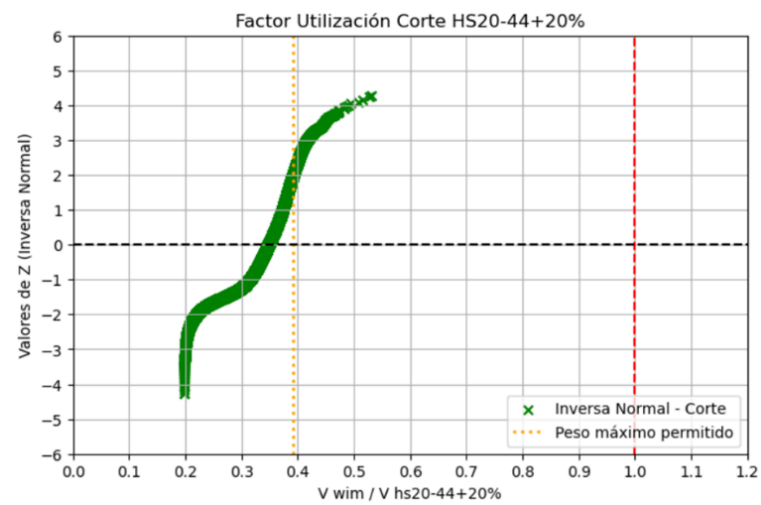


Figura A4.1.249 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 70m)

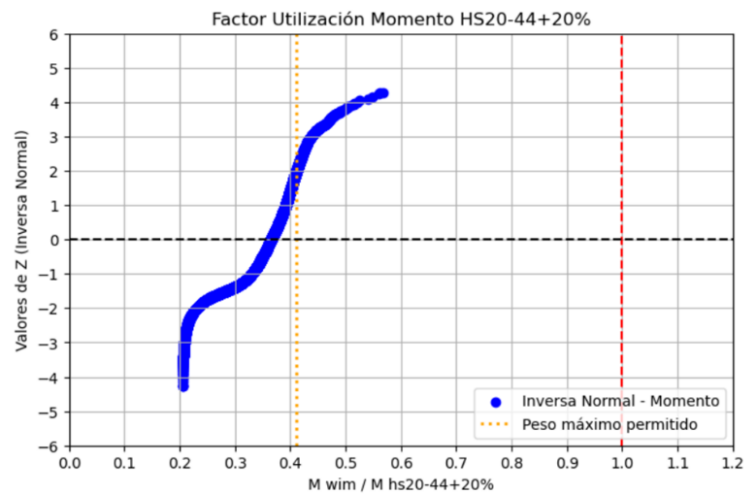


Figura A4.1.250 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 70m)

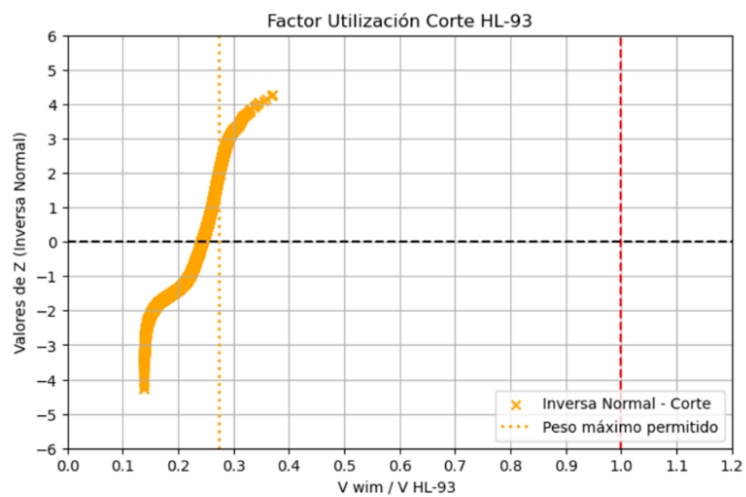


Figura A4.1.251 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 70m)

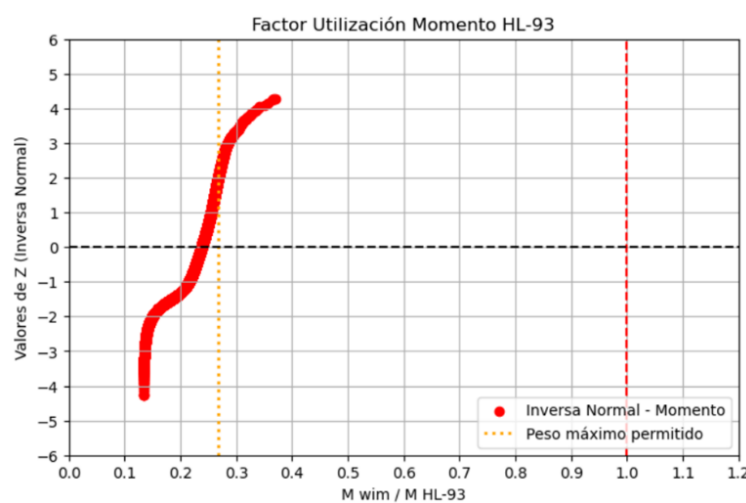


Figura A4.1.252 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2017, vano 70m)

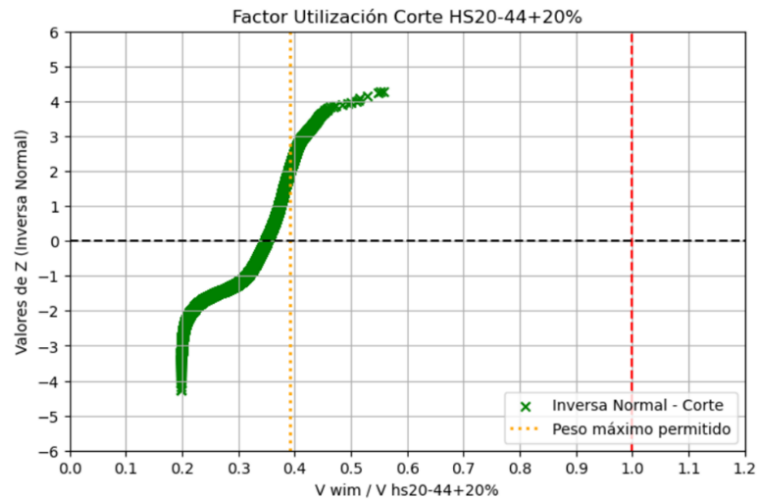


Figura A4.1.253 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 70m)

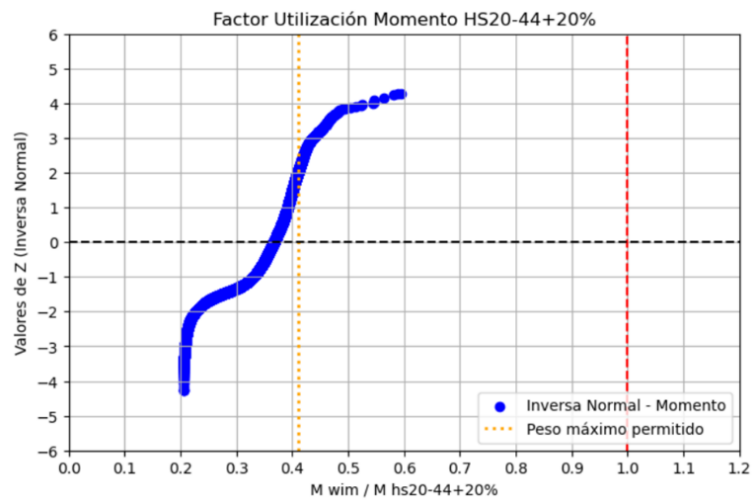


Figura A4.1.254 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 70m)

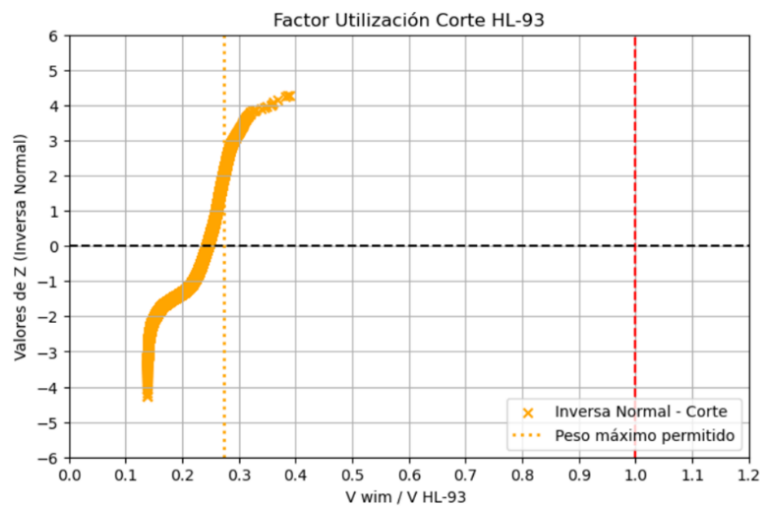


Figura A4.1.255 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 70m)

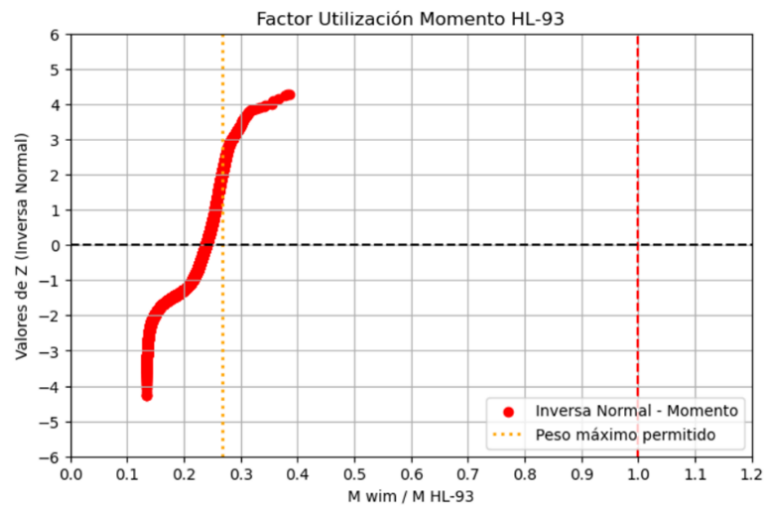


Figura A4.1.256 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 70m)

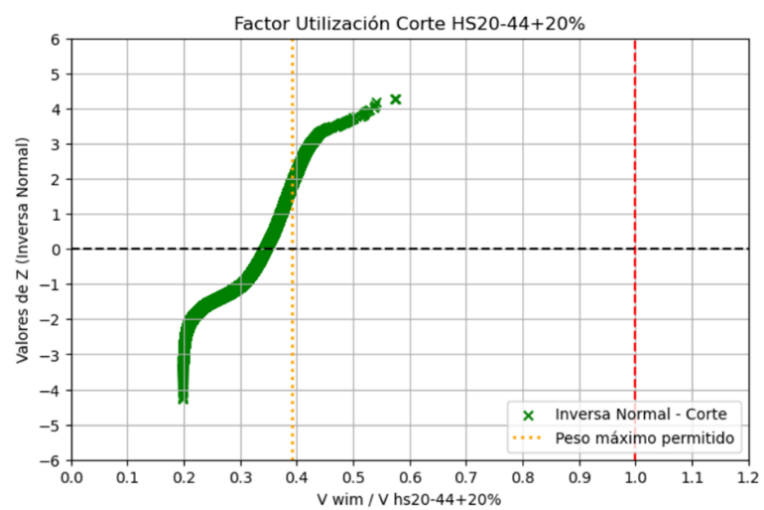


Figura A4.1.257 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 70m)

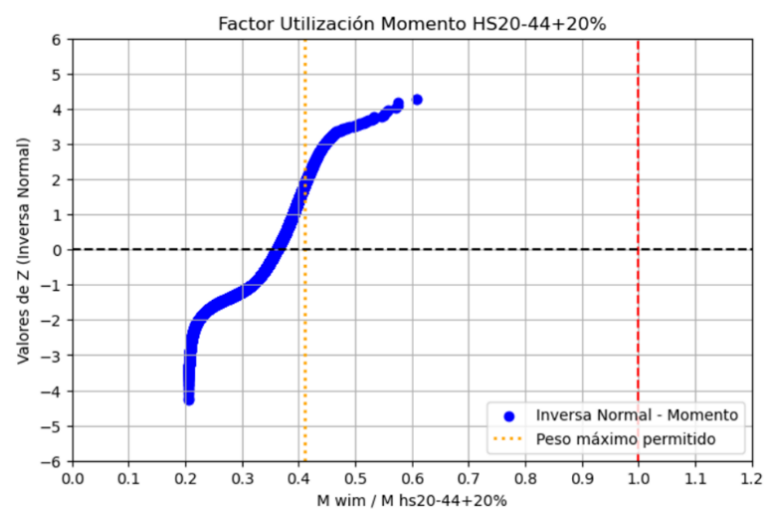


Figura A4.1.258 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 70m)

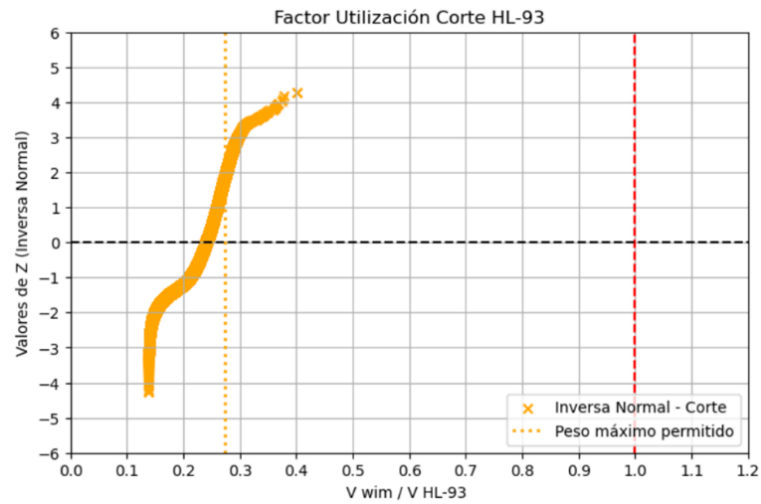


Figura A4.1.259 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 70m)

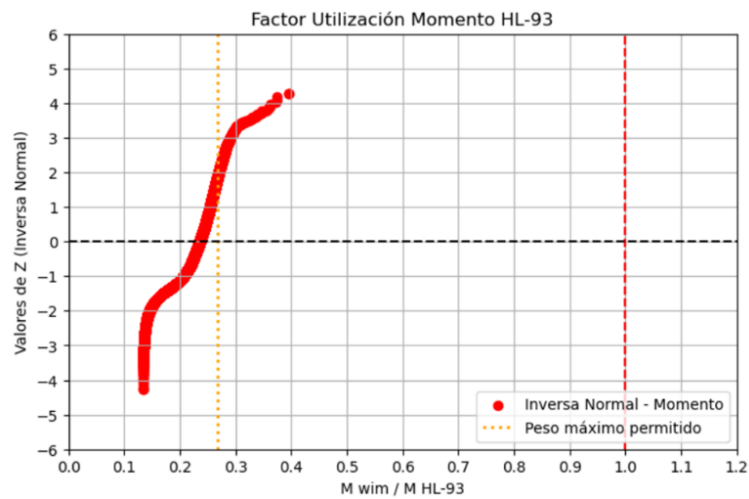


Figura A4.1.260 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 70m)

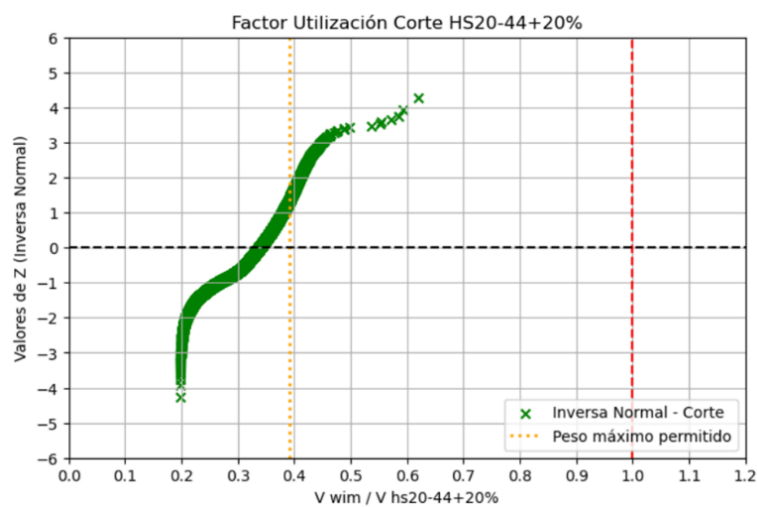


Figura A4.1.261 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 70m)

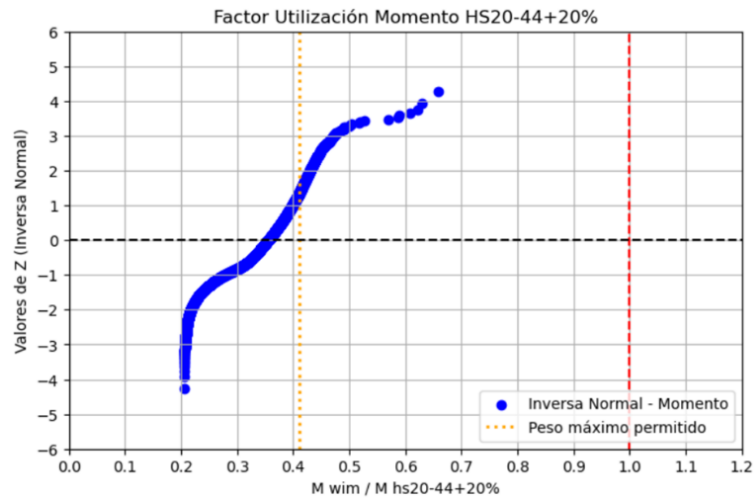


Figura A4.1.262 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 70m)

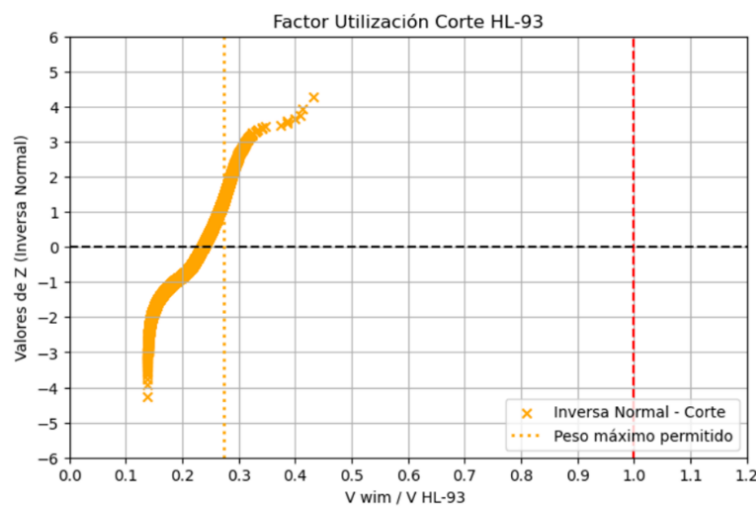


Figura A4.1.263 Distribución normal inversa, corte buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 70m)

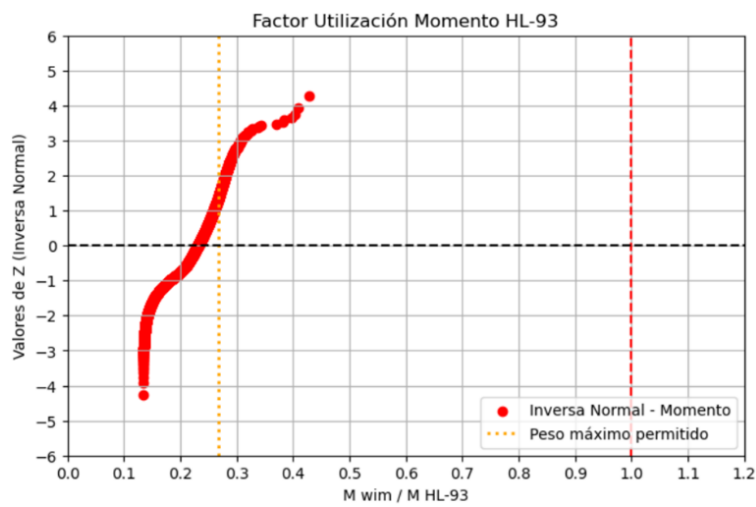


Figura A4.1.264 Distribución normal inversa, momento buses de 2 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 70m)

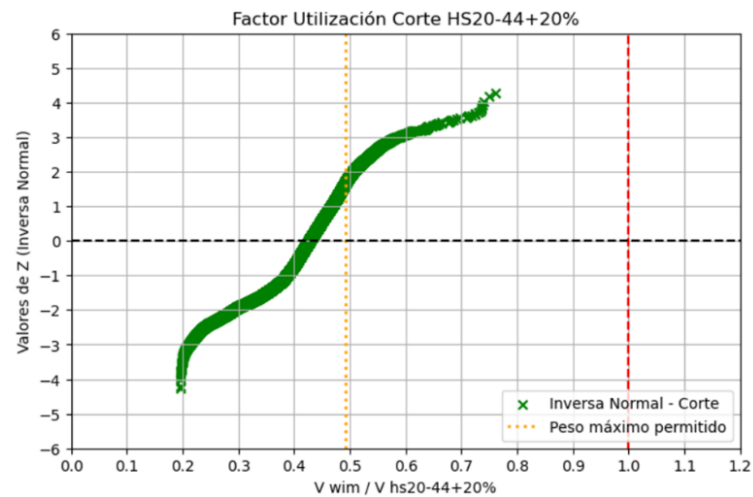


Figura A4.1.265 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 70m)

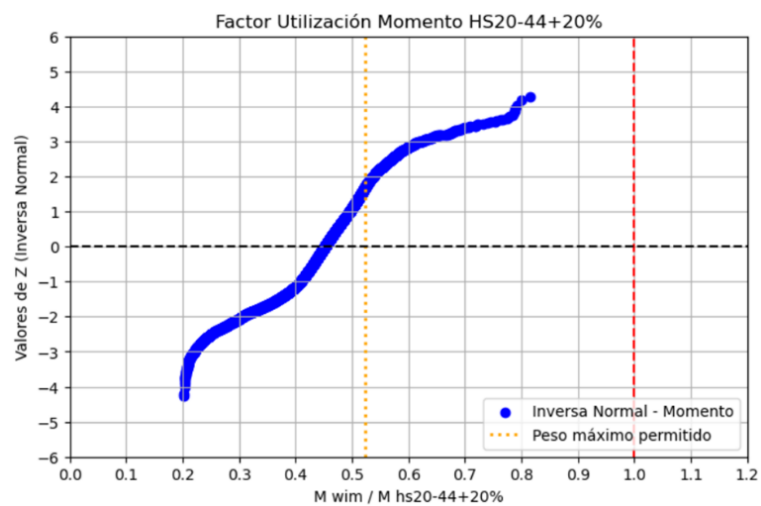


Figura A4.1.266 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2016, vano 70m)

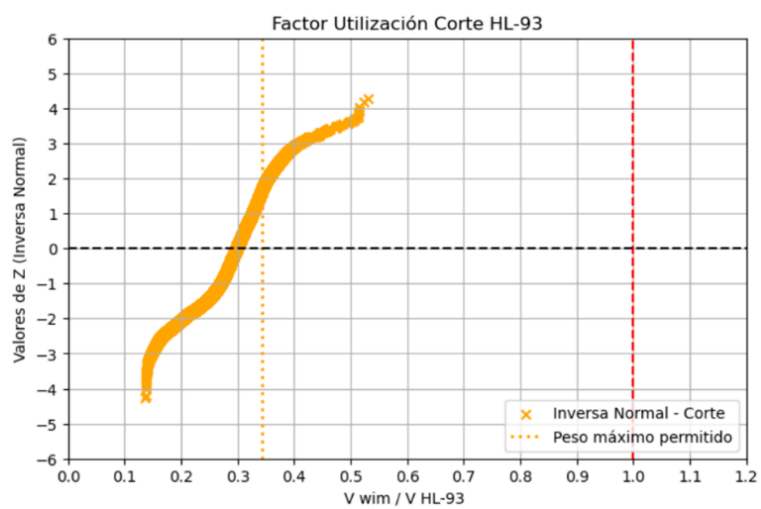


Figura A4.1.267 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 70m)

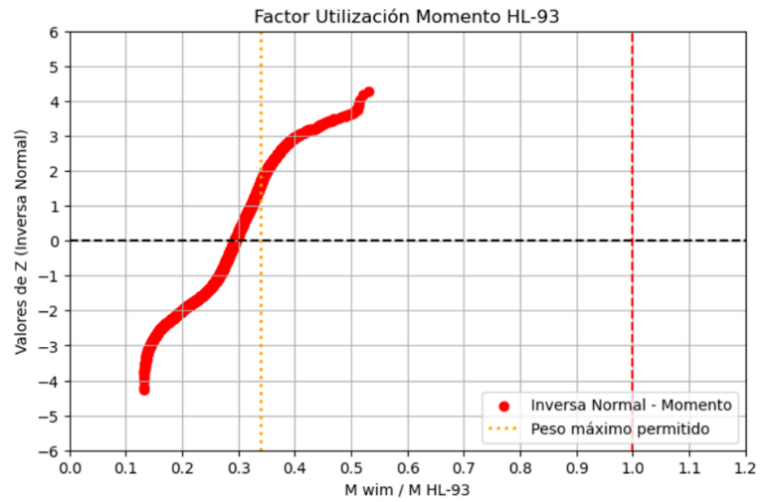


Figura A4.1.268 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2016, vano 70m)

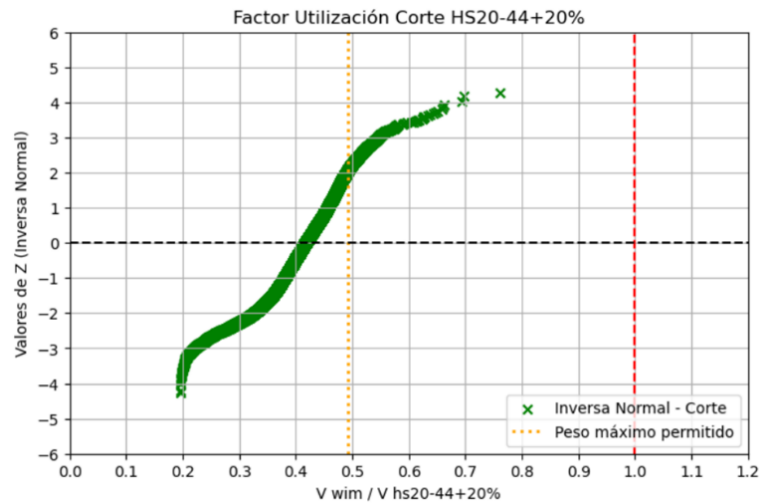


Figura A4.1.269 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 70m)

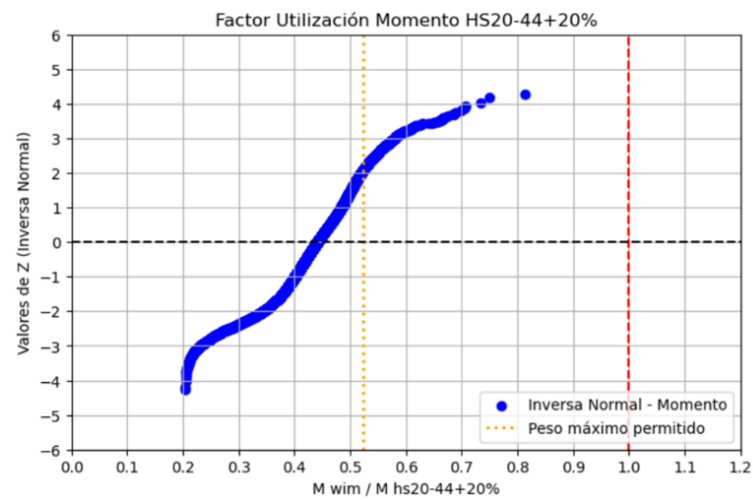


Figura A4.1.270 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2018, vano 70m)

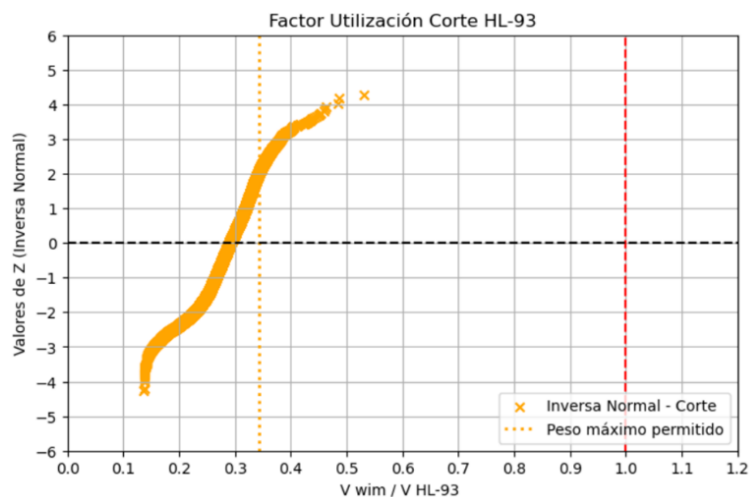


Figura A4.1.271 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 70m)

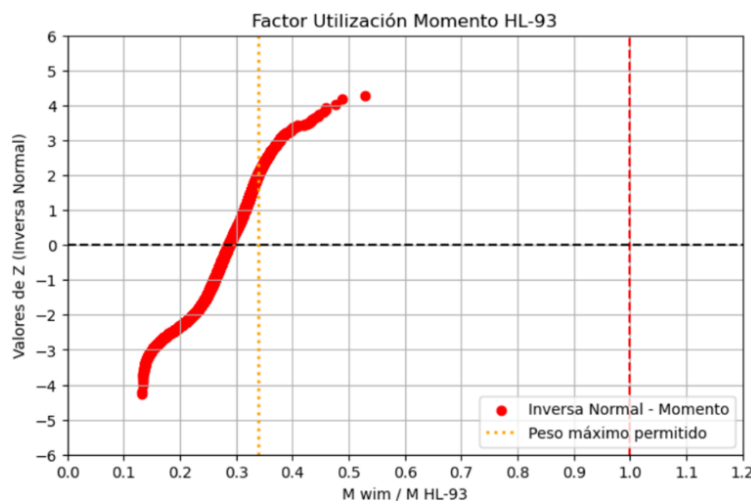


Figura A4.1.272 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2018, vano 70m)

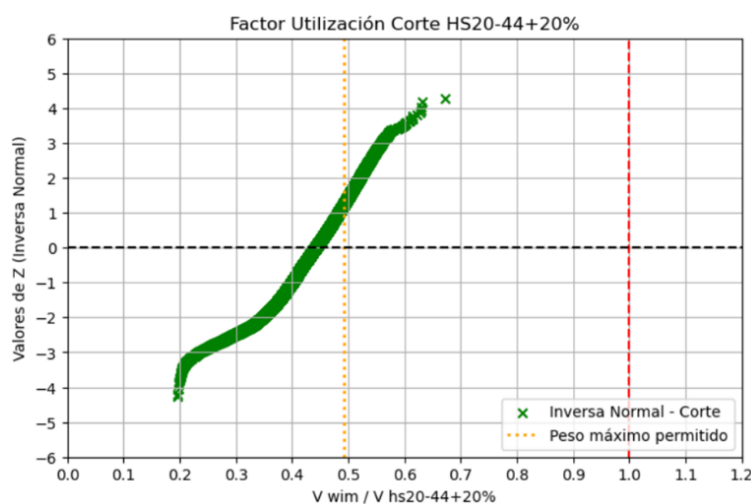


Figura A4.1.273 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 70m)

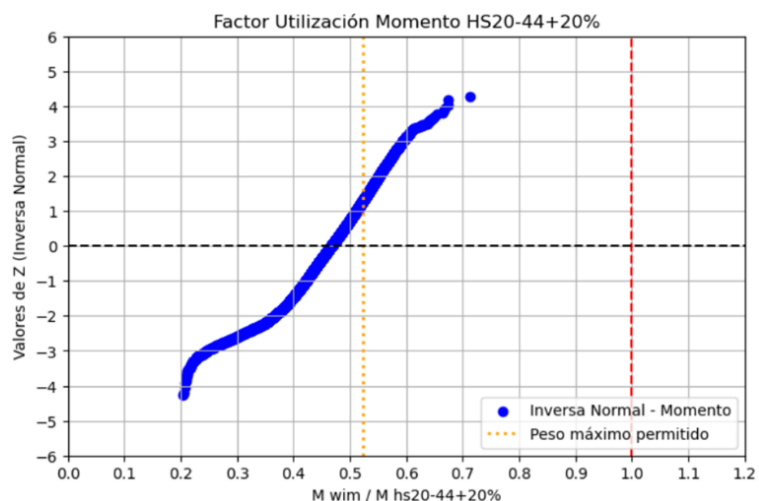


Figura A4.1.274 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2019, vano 70m)

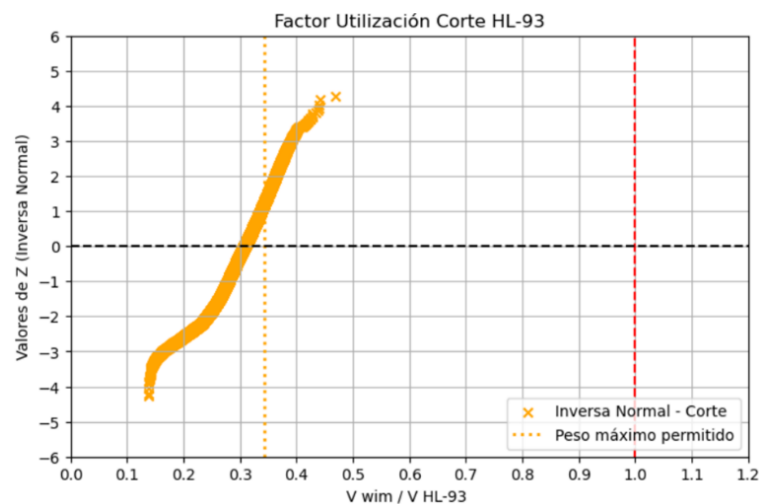


Figura A4.1.275 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 70m)

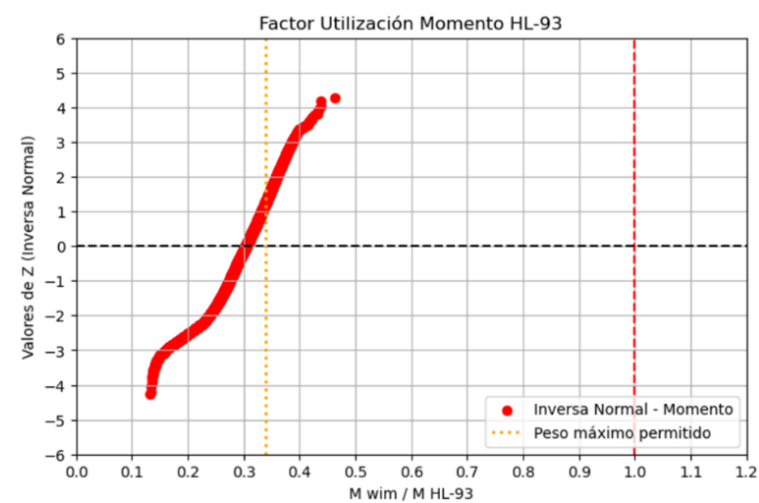


Figura A4.1.276 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2019, vano 70m)

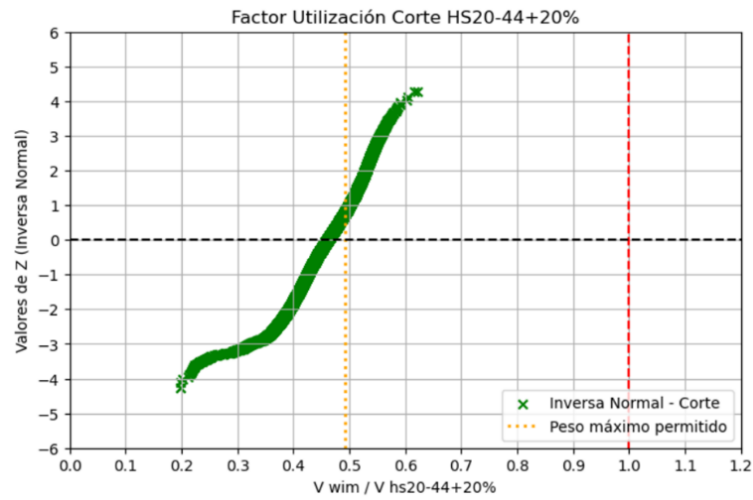


Figura A4.1.277 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 70m)

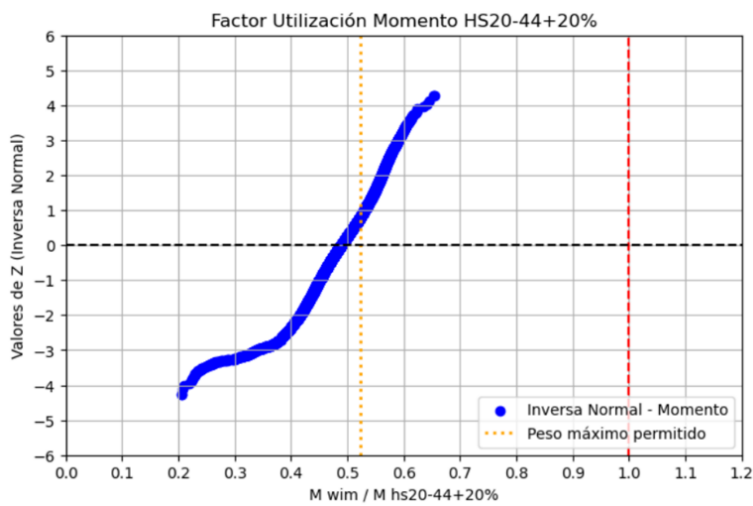


Figura A4.1.278 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu12 2022, vano 70m)

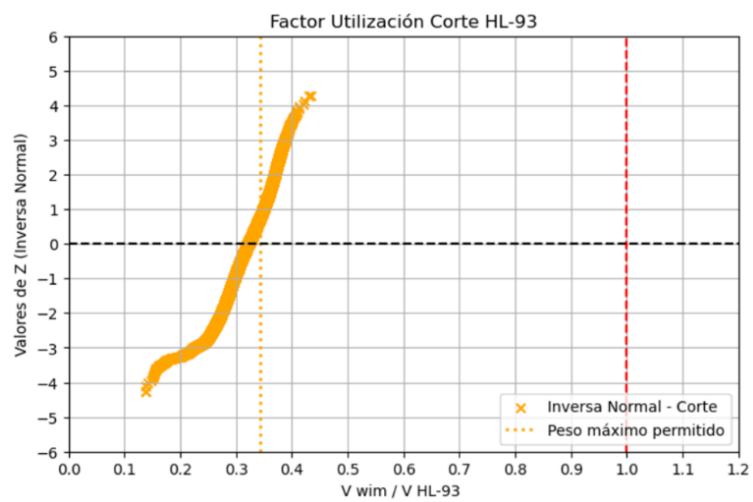


Figura A4.1.279 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 70m)

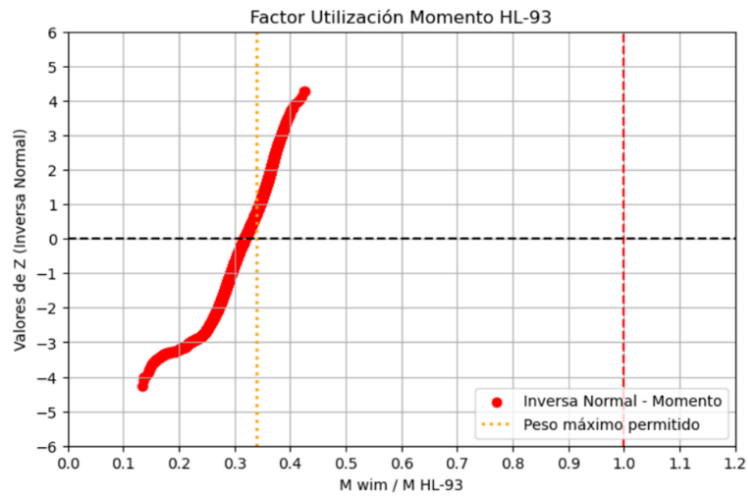


Figura A4.1.280 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu12 2022, vano 70m)

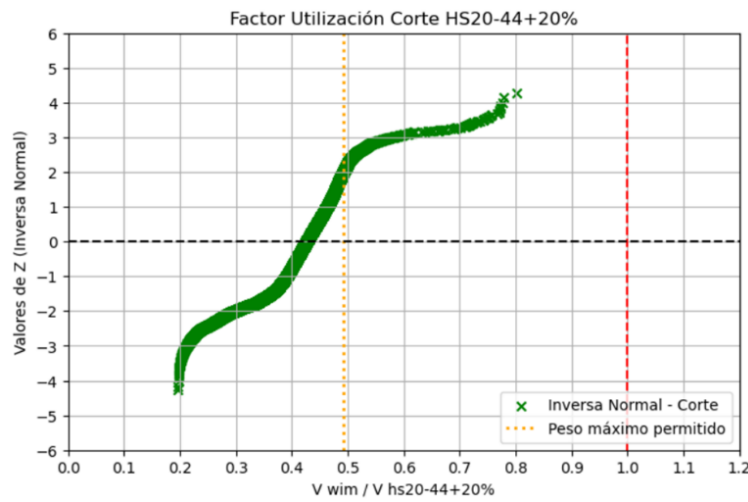


Figura A4.1.281 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 70m)

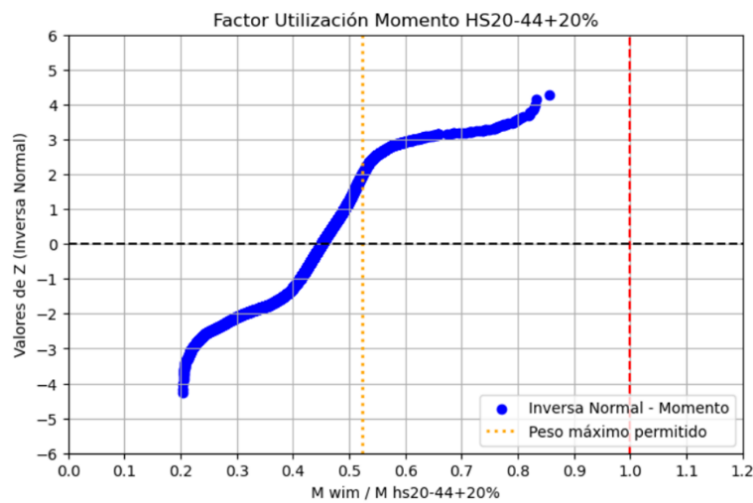


Figura A4.1.282 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2016, vano 70m)

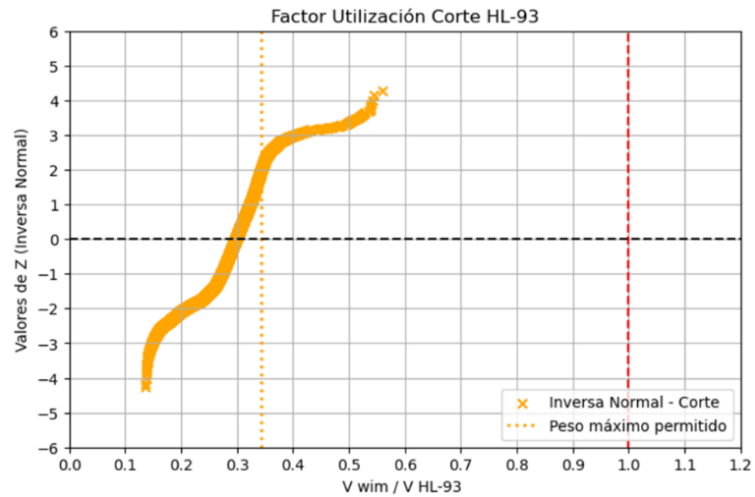


Figura A4.1.283 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 70m)

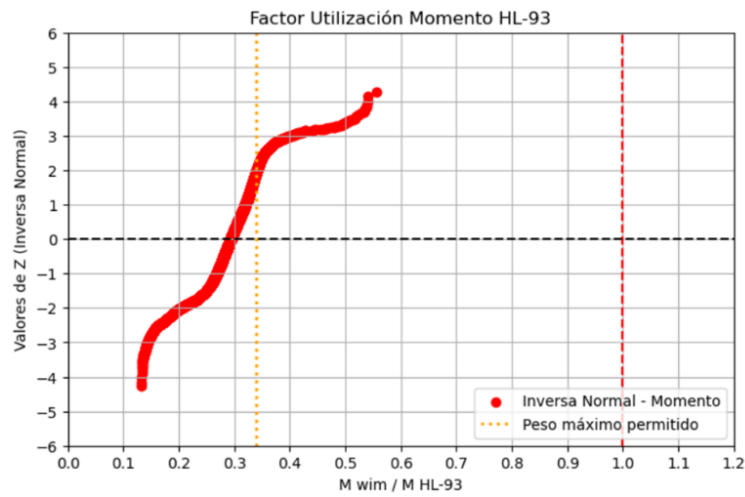


Figura A4.1.284 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2016, vano 70m)

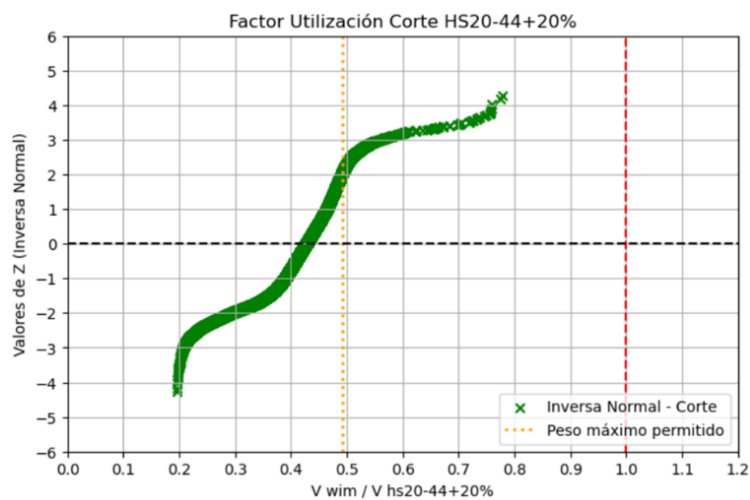


Figura A4.1.285 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2017, vano 70m)

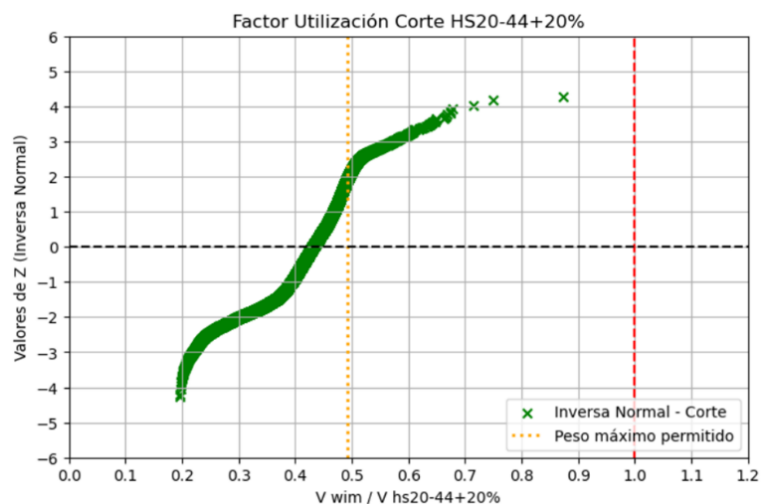


Figura A4.1.289 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 70m)

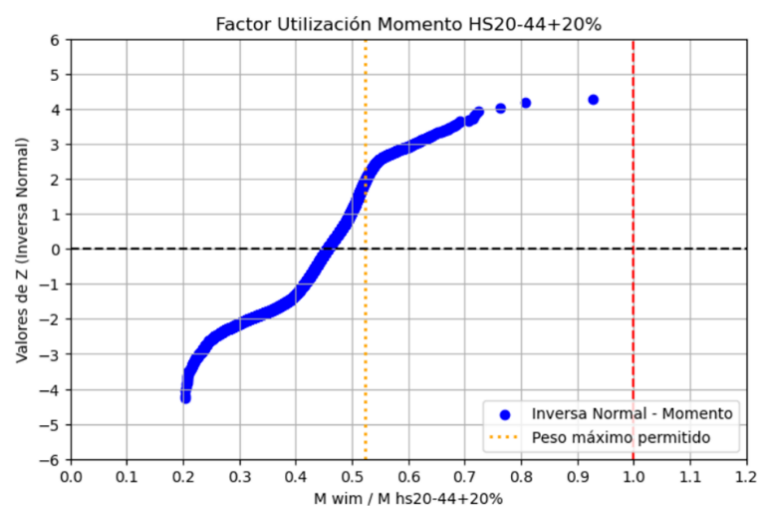


Figura A4.1.290 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2018, vano 70m)

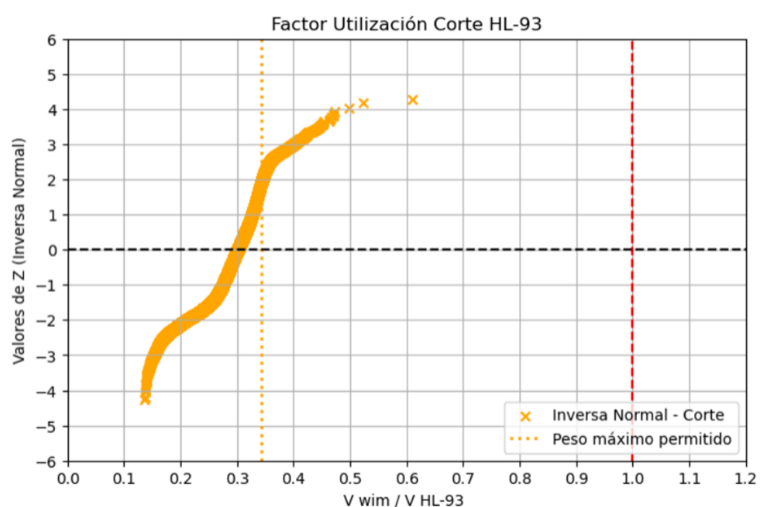


Figura A4.1.291 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 70m)

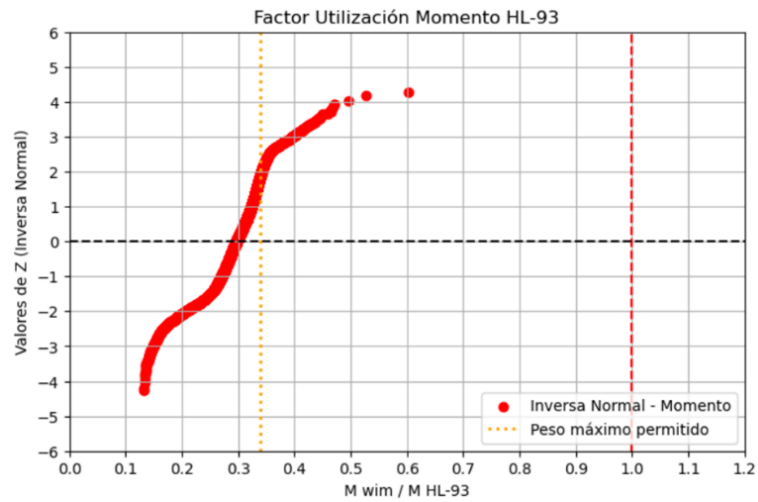


Figura A4.1.292 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2018, vano 70m)

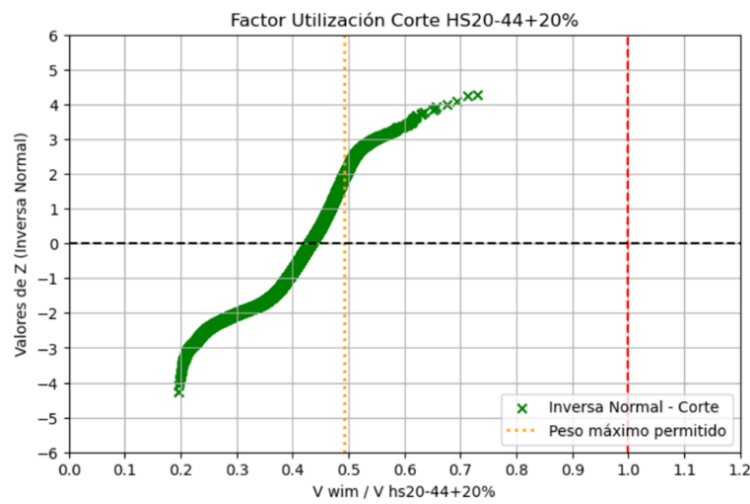


Figura A4.1.293 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 70m)

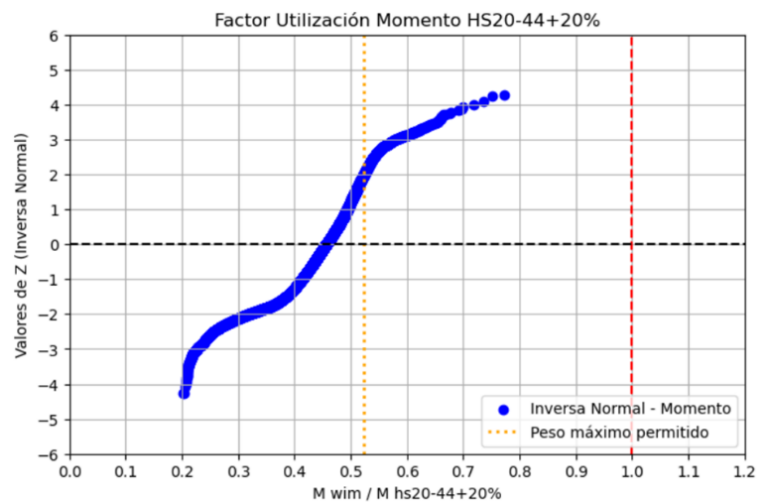


Figura A4.1.294 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2019, vano 70m)

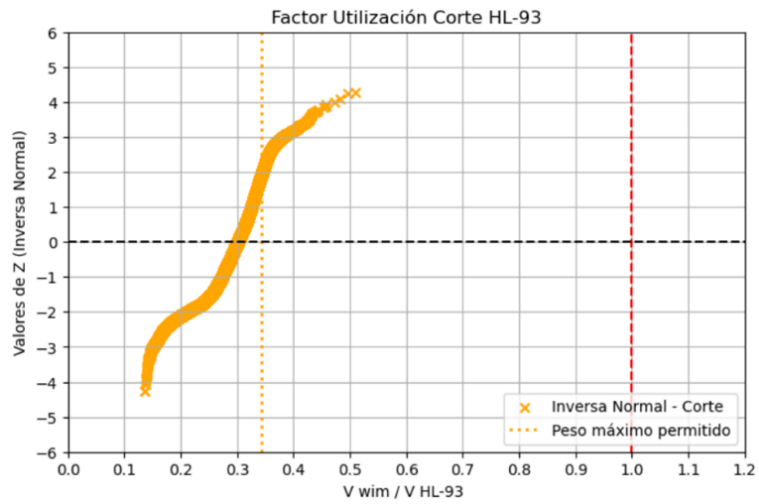


Figura A4.1.295 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 70m)

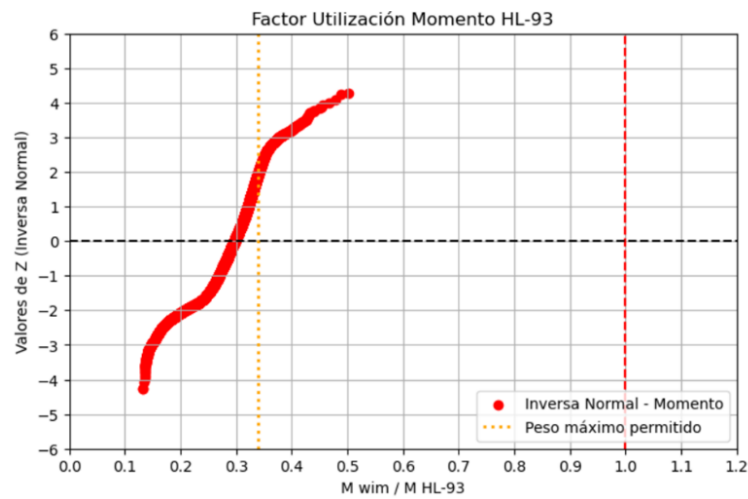


Figura A4.1.296 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2019, vano 70m)

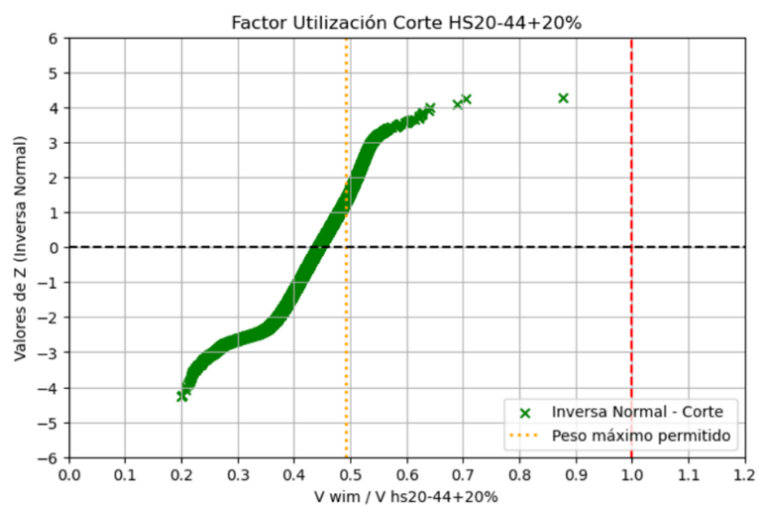


Figura A4.1.297 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 70m)

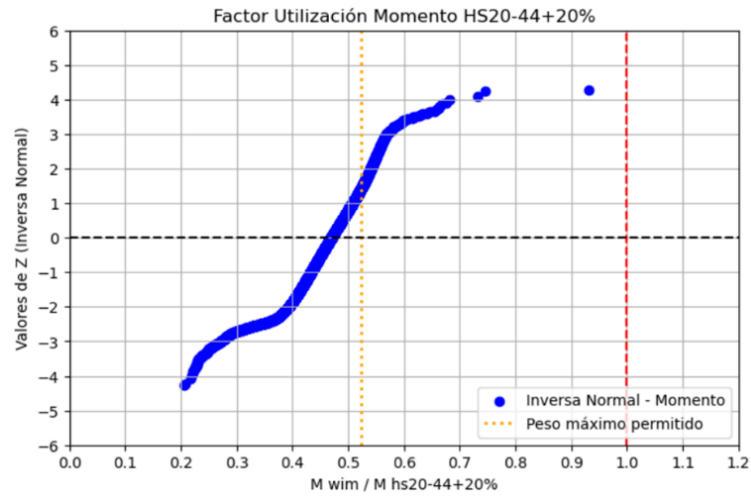


Figura A4.1.298 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HS20-44+20% (Cu34 2022, vano 70m)

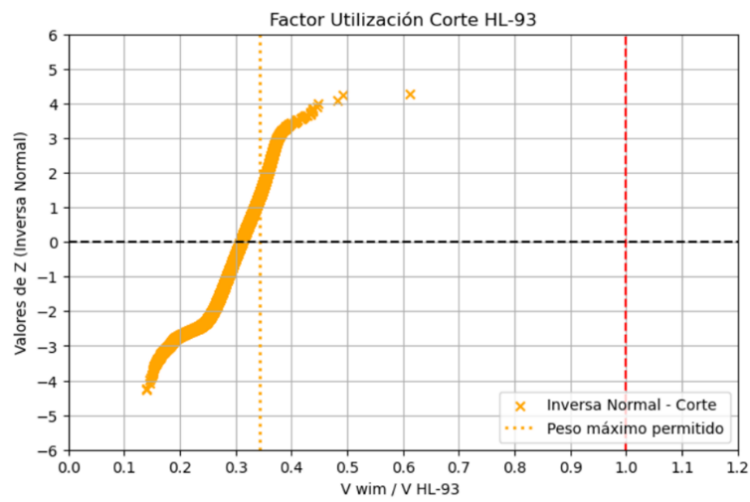


Figura A4.1.299 Distribución normal inversa, corte buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 70m)

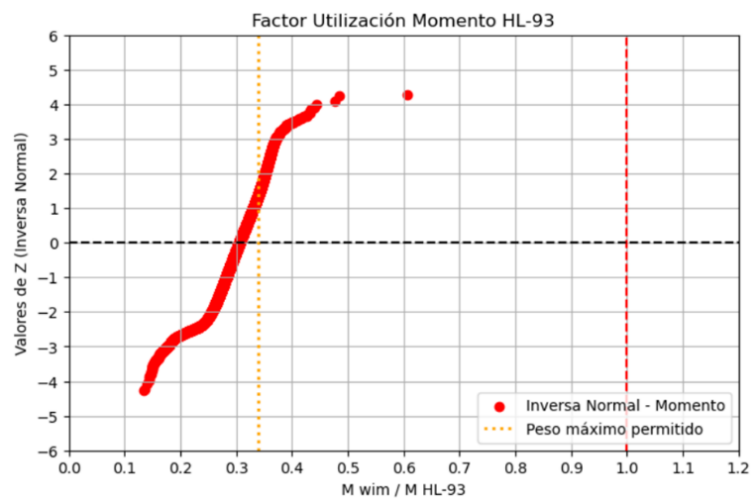


Figura A4.1.300 Distribución normal inversa, momento buses de 3 ejes/HL-93 (Cu34 2022, vano 70m)

ANEXO 4.2: Comparación mediante percentiles

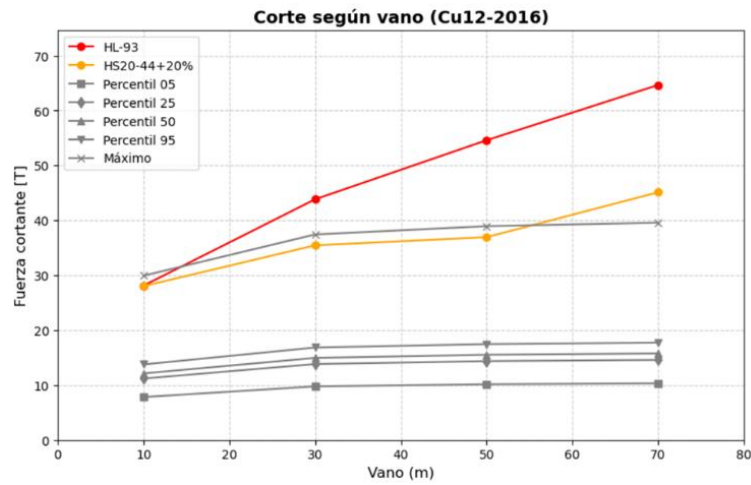


Figura 4.2.1 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2016)

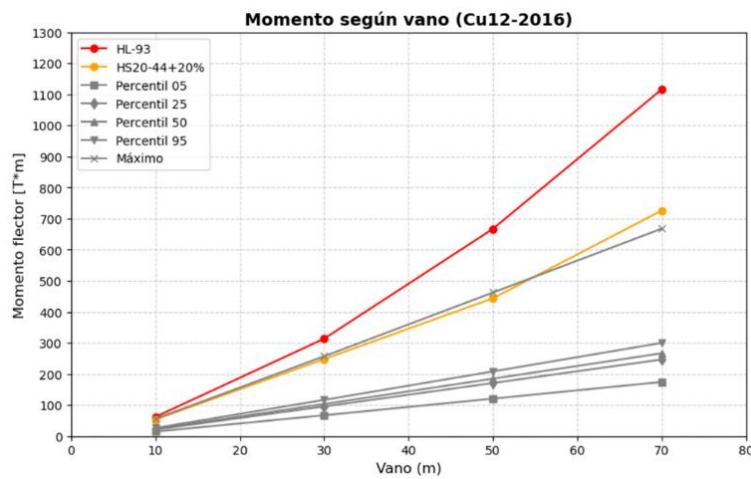


Figura 4.2.2 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2016)

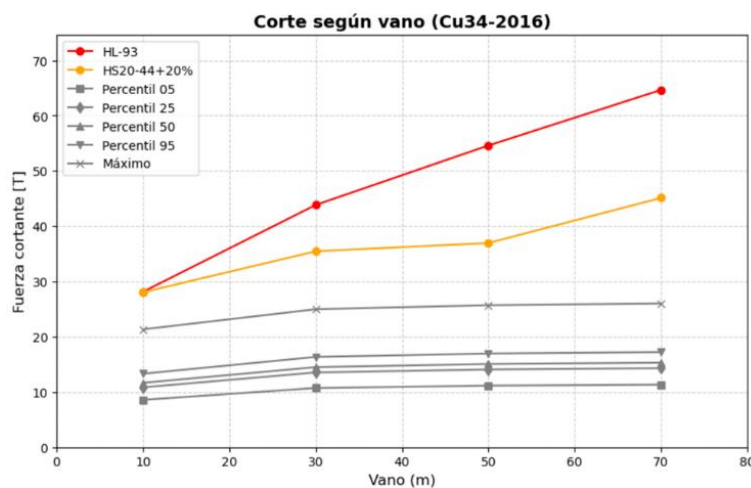


Figura 4.2.3 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2016)

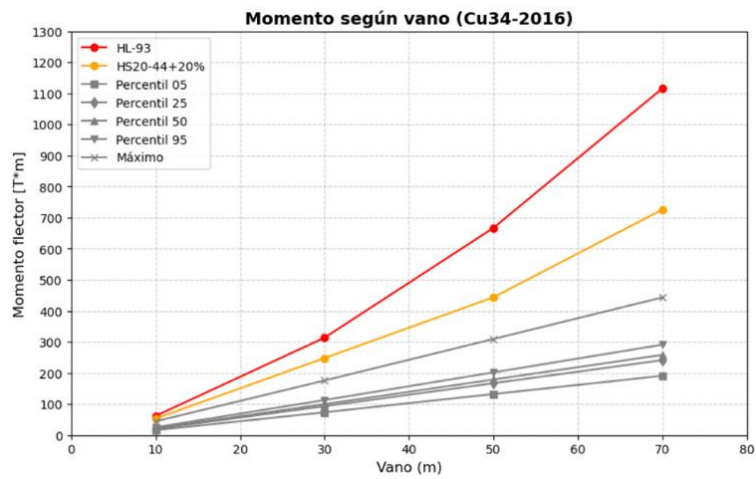


Figura 4.2.4 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2016)

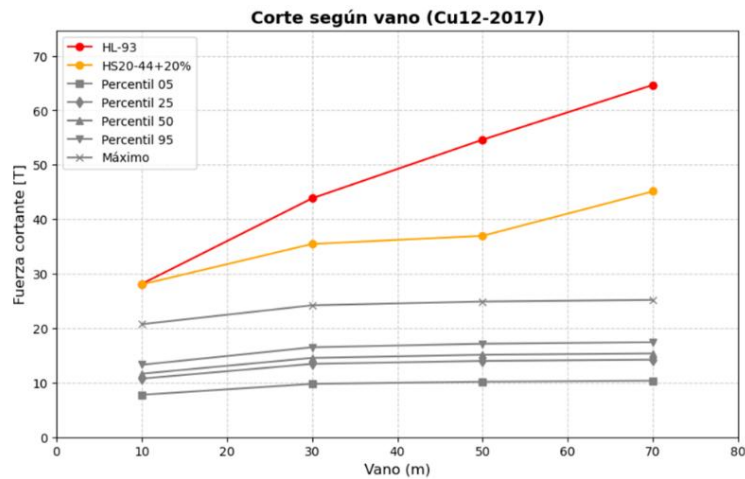


Figura 4.2.5 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2017)

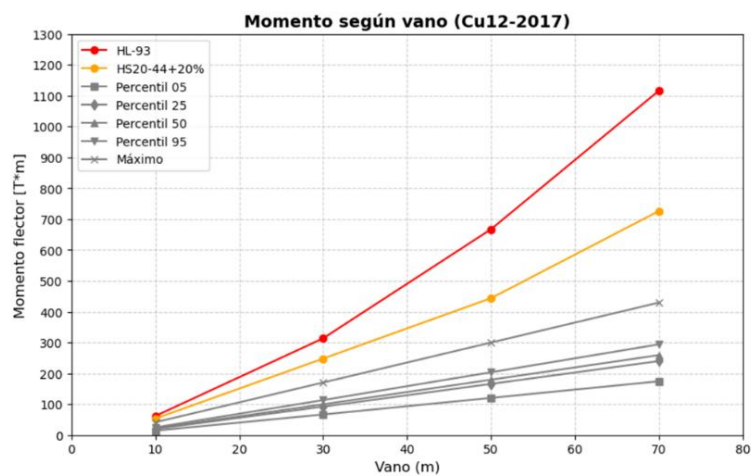


Figura 4.2.6 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2017)

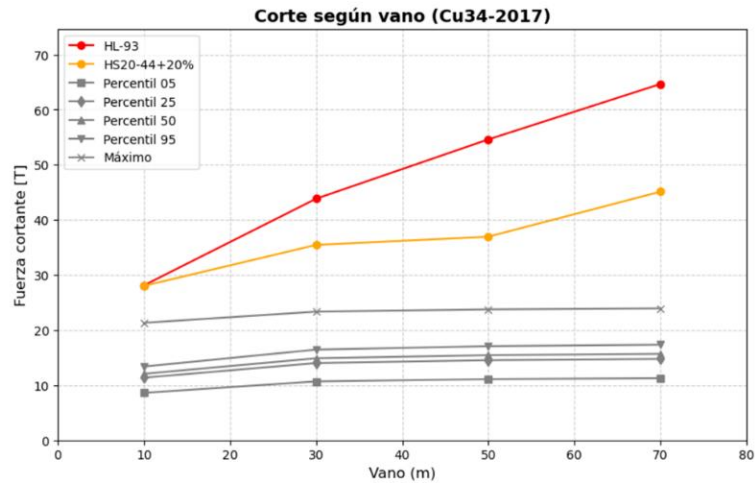


Figura 4.2.7 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2017)

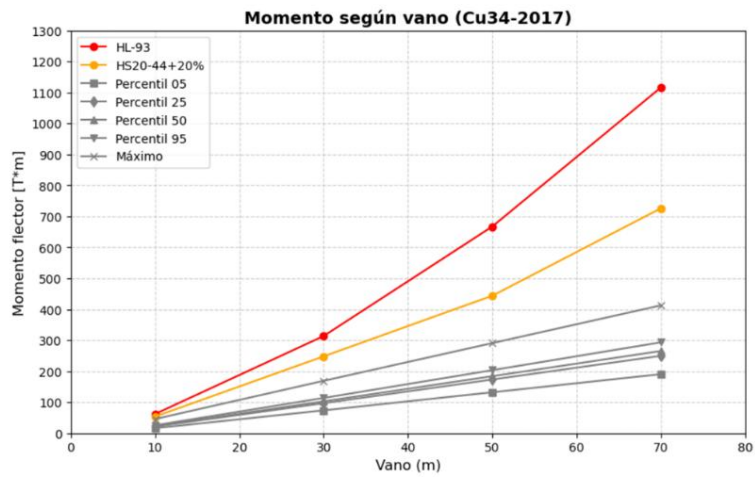


Figura 4.2.8 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2017)

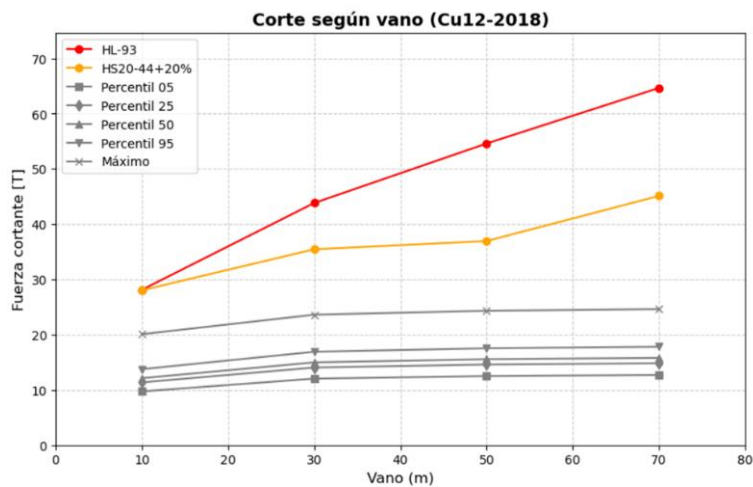


Figura 4.2.9 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2018)

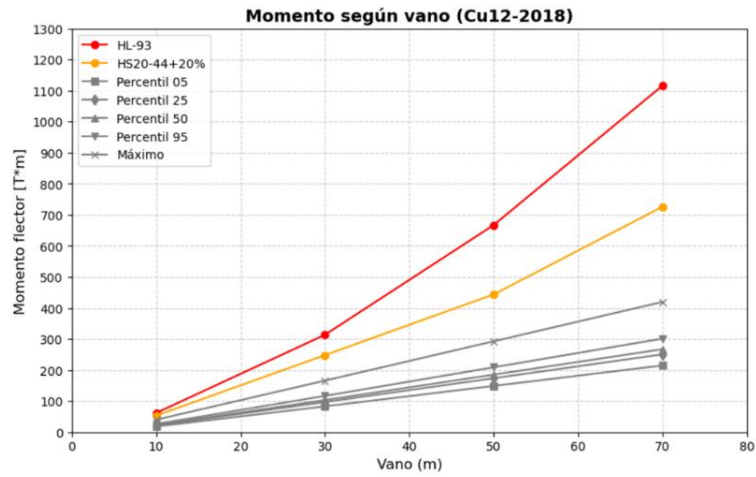


Figura 4.2.10 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2018)

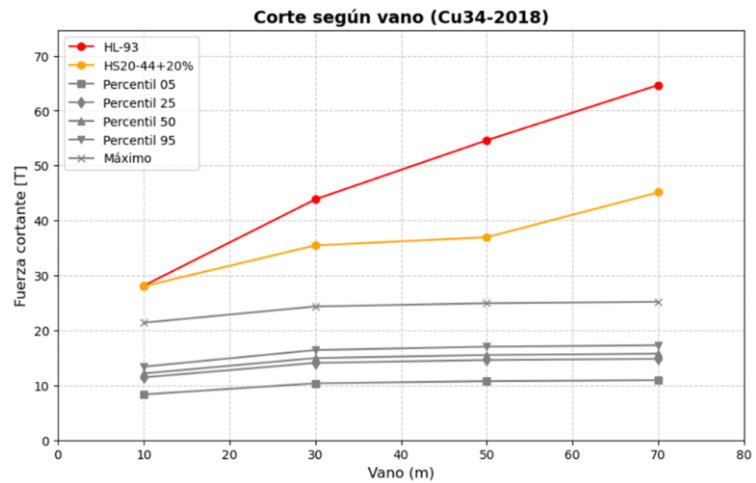


Figura 4.2.11 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2018)

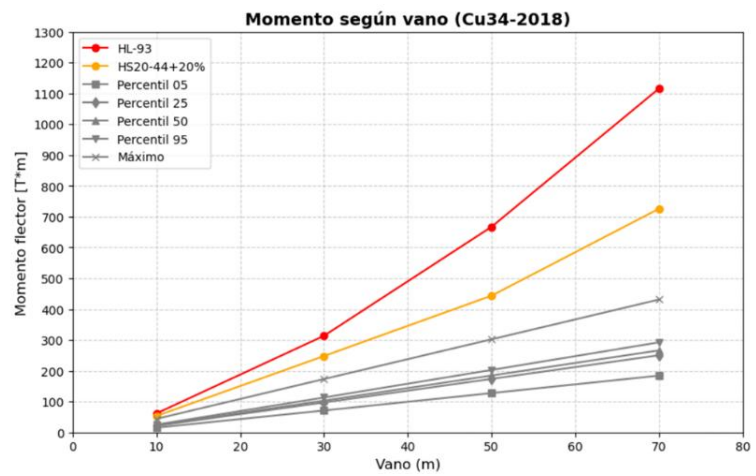


Figura 4.2.12 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2018)

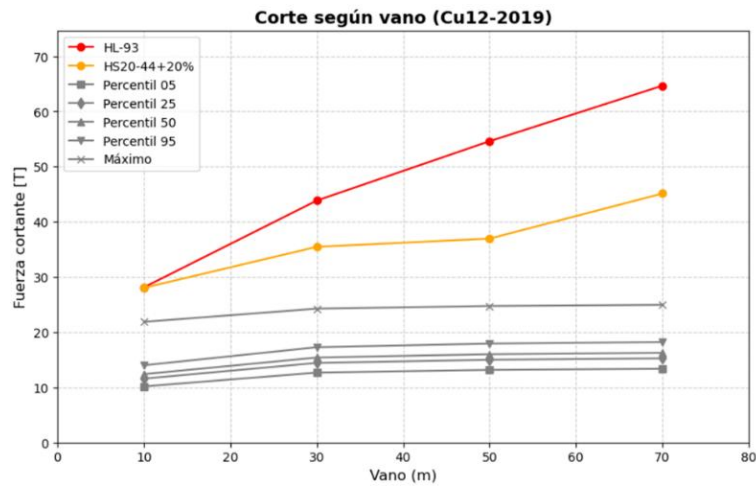


Figura 4.2.13 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2019)

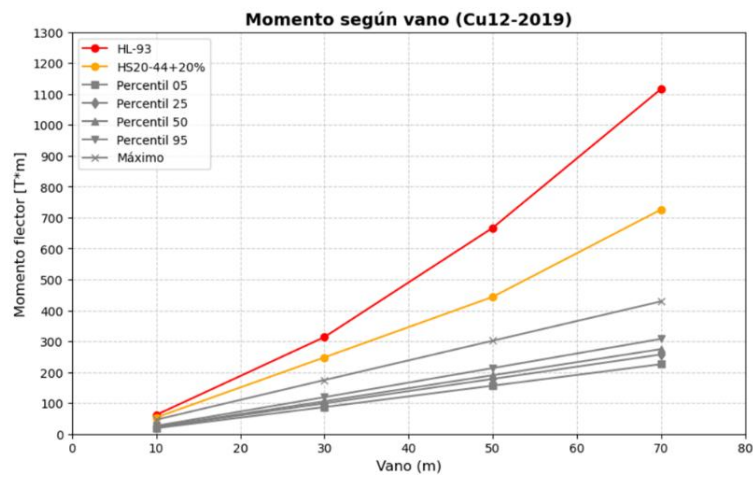


Figura 4.2.14 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2019)

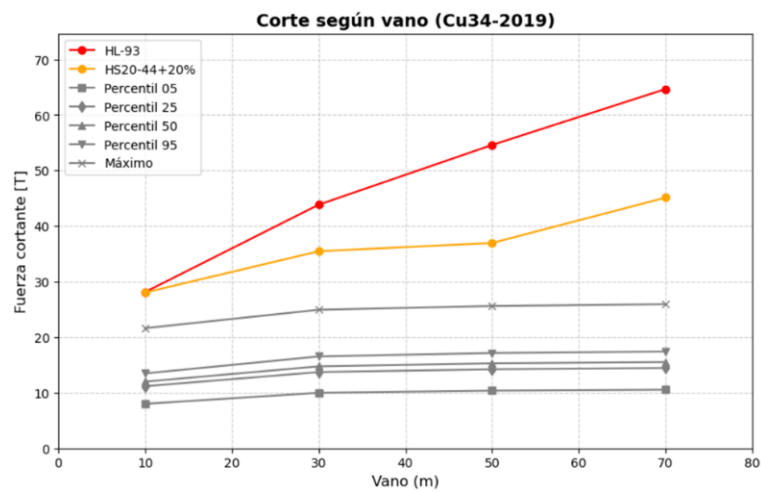


Figura 4.2.15 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2019)

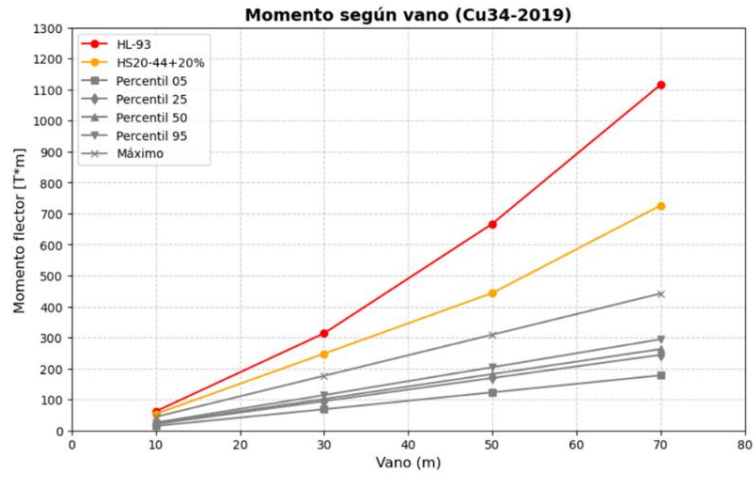


Figura 4.2.16 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2019)

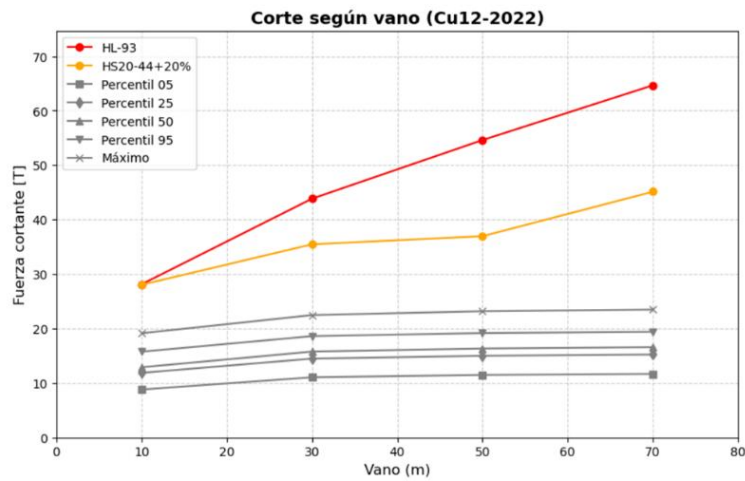


Figura 4.2.17 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2022)

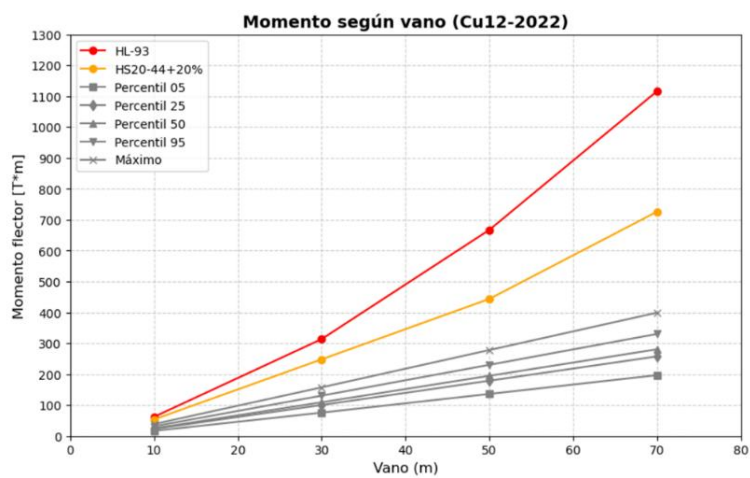


Figura 4.2.18 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu12 2022)

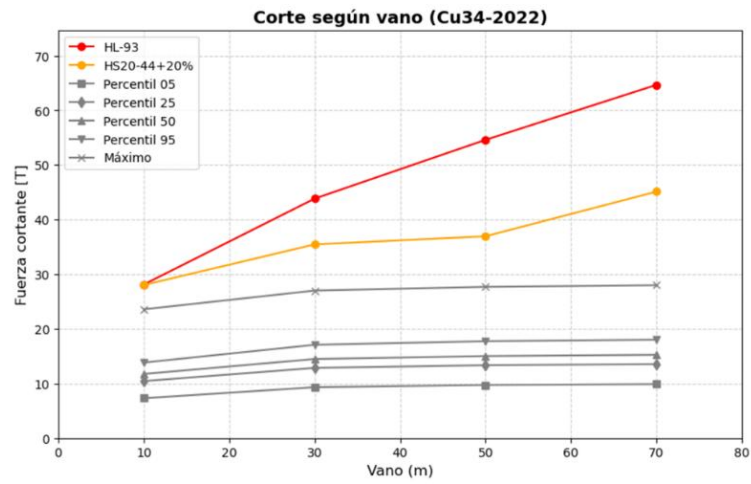


Figura 4.2.19 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2022)

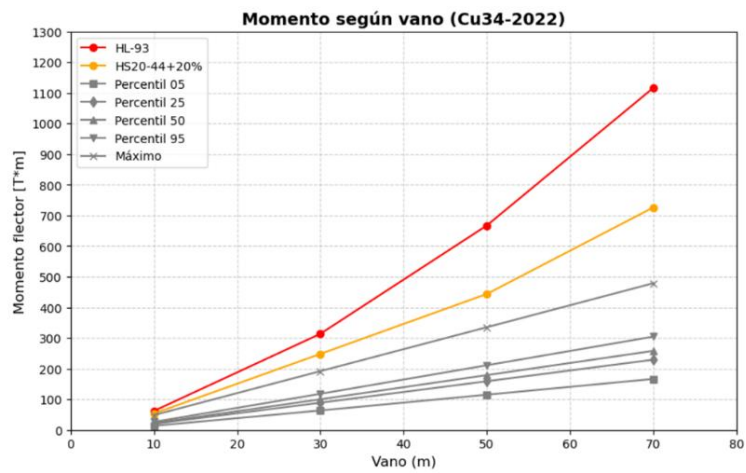


Figura 4.2.20 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 2 ejes, Cu34 2022)

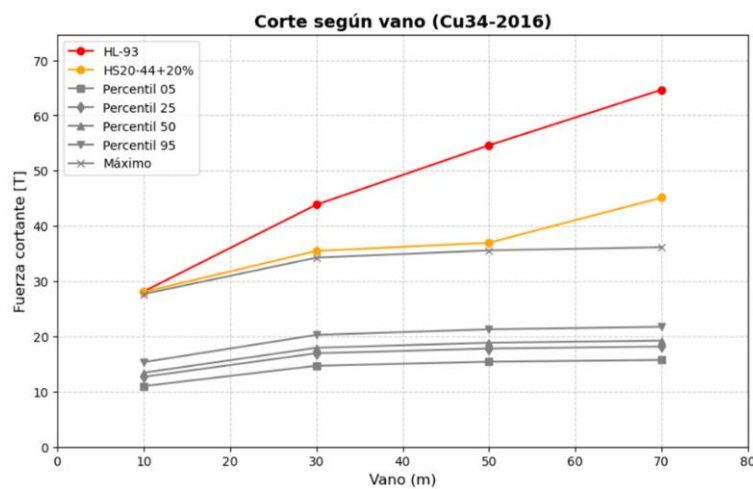


Figura 4.2.21 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2016)

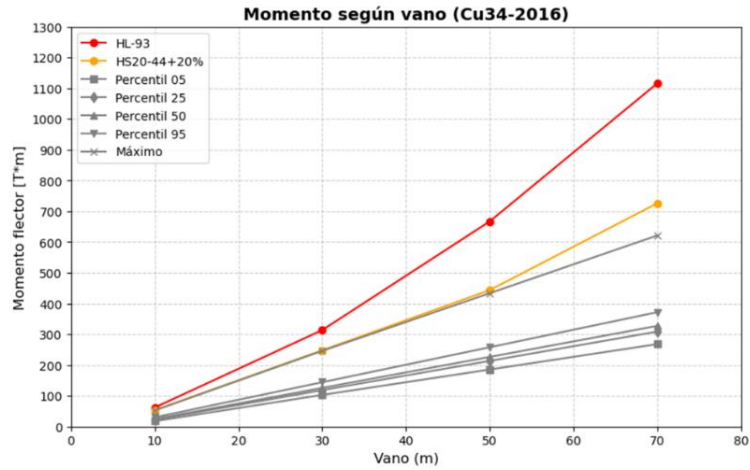


Figura 4.2.22 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2016)

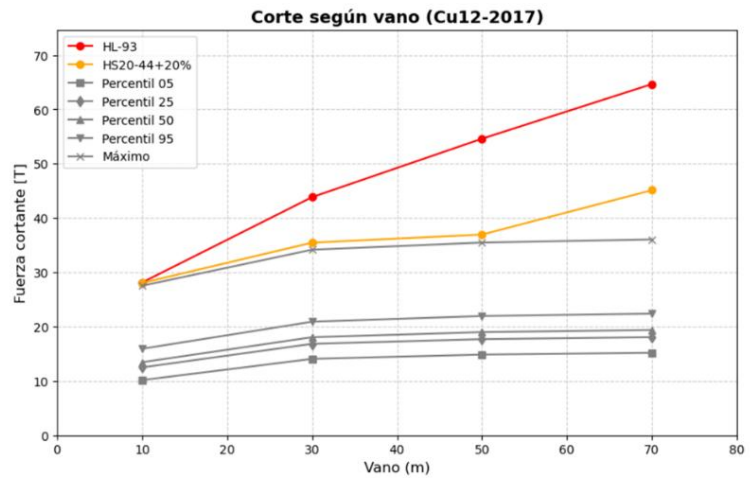


Figura 4.2.23 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu12 2017)

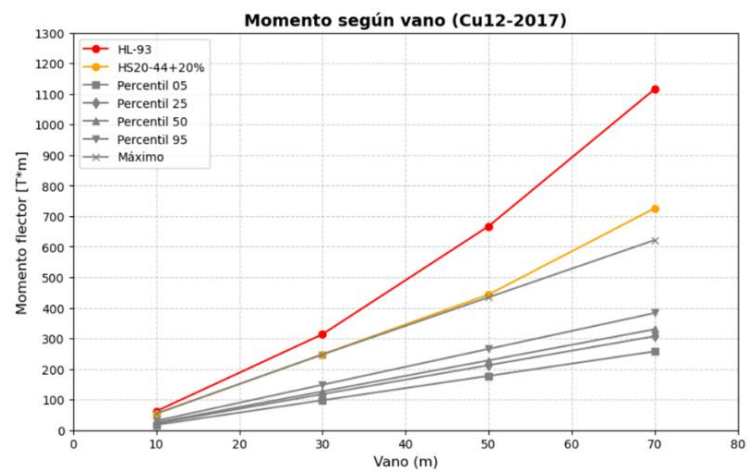


Figura 4.2.24 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu12 2017)

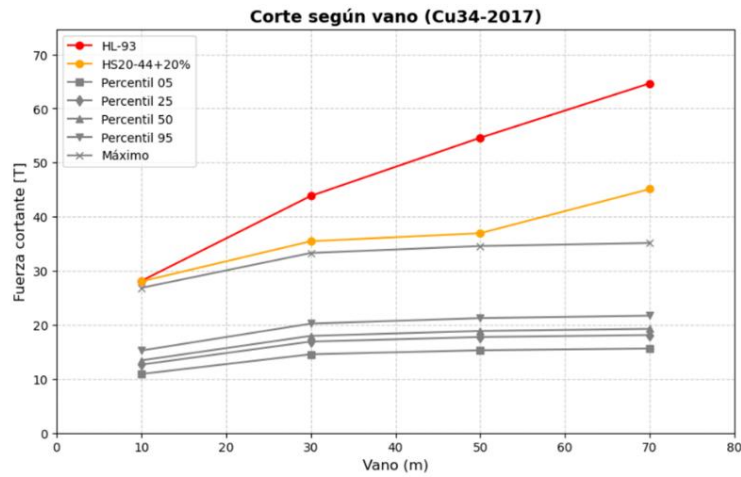


Figura 4.2.25 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2017)

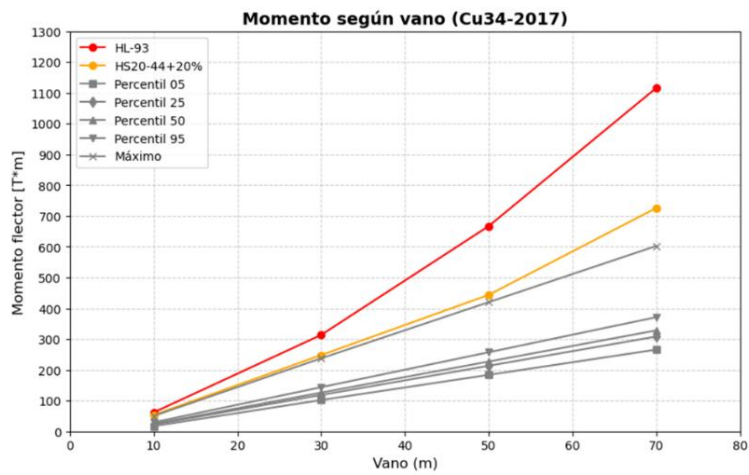


Figura 4.2.26 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2017)

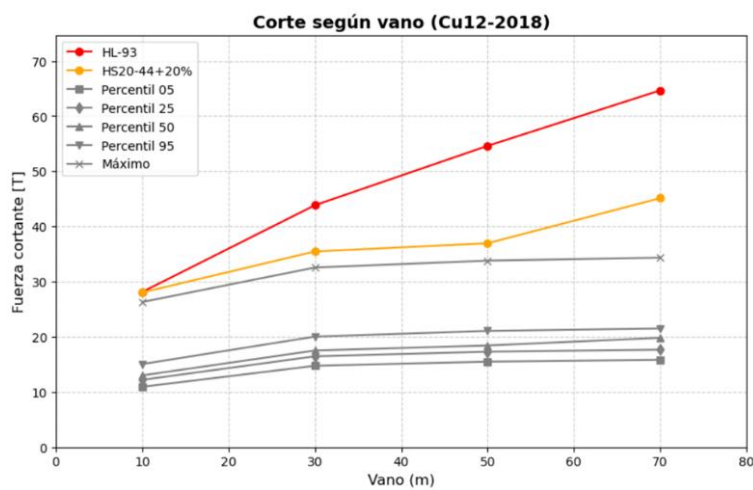


Figura 4.2.27 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu12 2018)

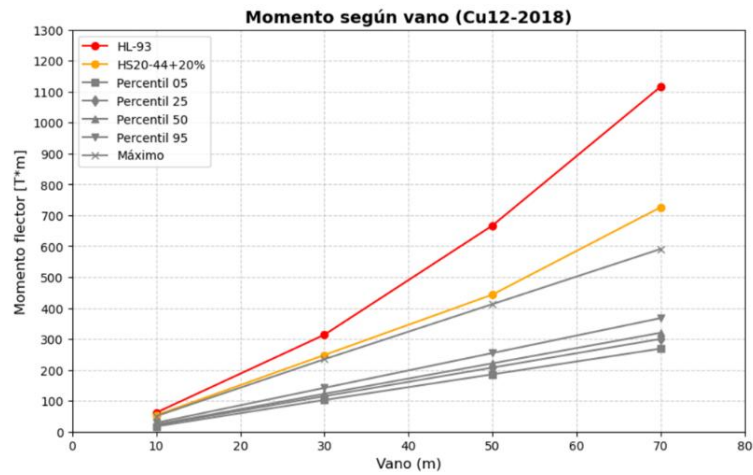


Figura 4.2.28 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu12 2018)

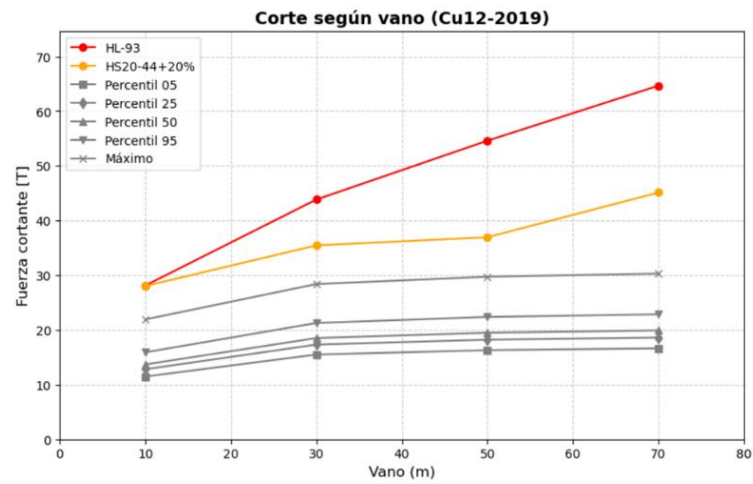


Figura 4.2.29 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu12 2019)

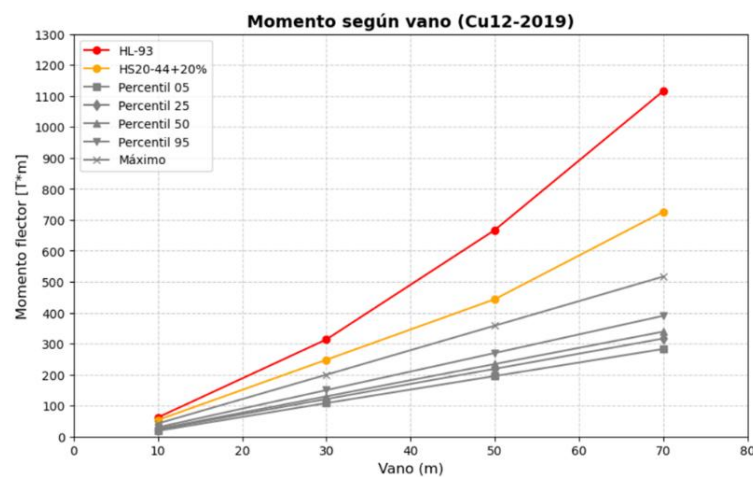


Figura 4.2.30 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu12 2019)

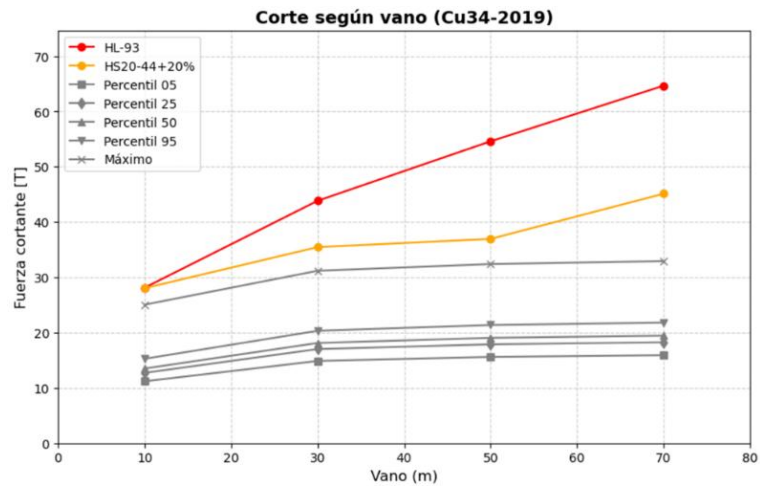


Figura 4.2.31 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2019)

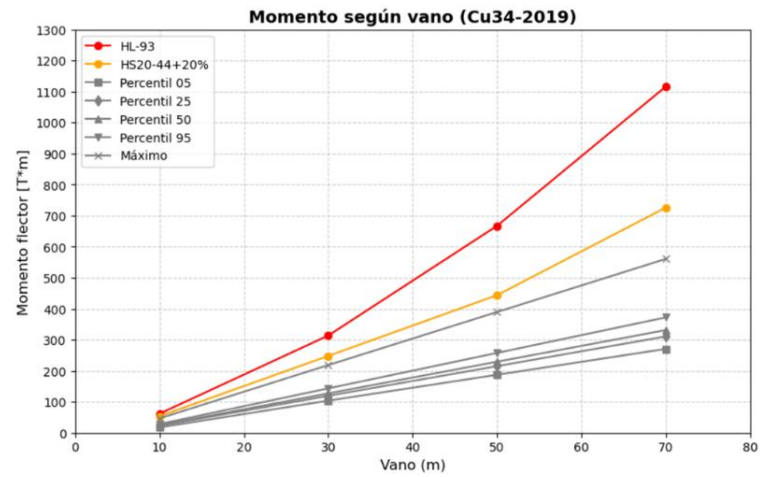


Figura 4.2.32 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2019)

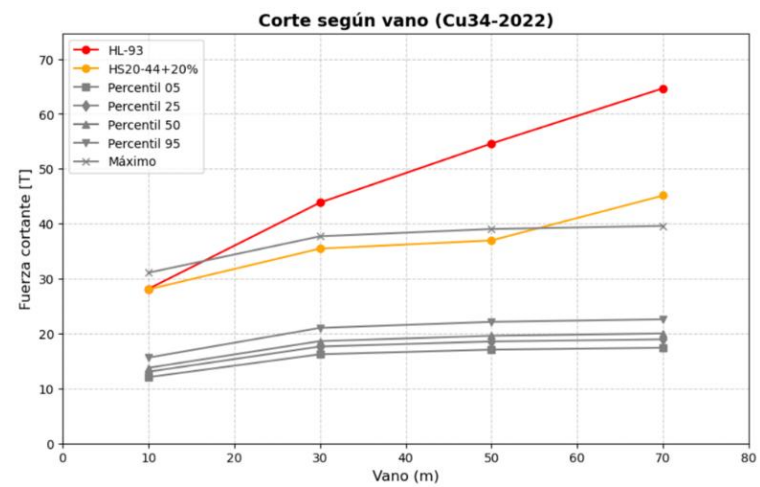


Figura 4.2.33 Percentiles de corte demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2022)

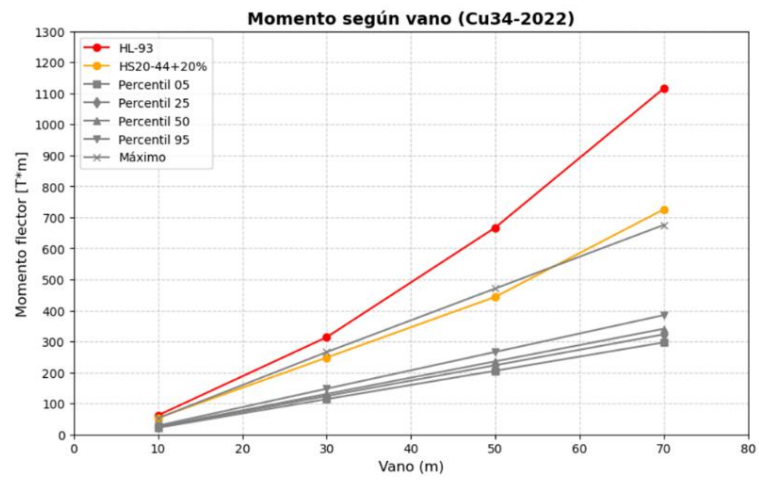


Figura 4.2.34 Percentiles de momento demanda real y demandas de diseño (buses de 3 ejes, Cu34 2022)

ANEXO 3.1: Código identificación y control de calidad datos años 2016 al 2019

A continuación, se adjunta el código utilizado para identificar y realizar el control de calidad a los buses de dos y tres ejes en la base de datos de los años 2016 al 2019 de la estación de pesaje de Curacaví:

```
import pandas as pd
import glob

folder_path = 'D:\\YEAR\\SELECTIVA\\2018\\Curacavi\\Cu-12\\'
file_pattern = folder_path + '*.dat'
file_paths = glob.glob(file_pattern)
all_data = []
column_names = ['sample', 'fecha', 'hora', 'vel', 'tipo_DV', 'msg', 'largo', 'estacion', 'P1', 'P2', 'P3',
                'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'P10', 'P11', 'P12']

# Leer y procesar cada archivo
for file_path in file_paths:
    try:
        data_raw = pd.read_csv(file_path, sep=r'\n', header=None, engine='python',
                               encoding='latin1')
        data_fixed = data_raw[0].str.split(',', expand=True)
        data_fixed = data_fixed.dropna(axis=1, how='all')

        num_columns = len(data_fixed.columns)
        expected_columns = column_names[:num_columns] # Ajuste dinámico de columnas

        if len(data_fixed.columns) != len(expected_columns):
            print(f'Advertencia: Desajuste de longitud de columnas en el archivo: {file_path}')
            print(f'Se esperaban {len(expected_columns)} columnas, pero se obtuvieron
                  {len(data_fixed.columns)}.')
            # Ajustar los nombres de las columnas según la cantidad de columnas reales
            data_fixed.columns = expected_columns[:len(data_fixed.columns)]
        else:
            data_fixed.columns = expected_columns
```

```
# Verificar si tipo_DV existe en el archivo
if 'tipo_DV' in data_fixed.columns:
    data_fixed['tipo_DV'] = data_fixed['tipo_DV'].astype(str).str.strip().str.replace(r'^\w', "",
regex=True)
else:
    print(f"tipo_DV' column not found in file: {file_path}")
    continue

# Convertir todas las columnas de peso a numéricas, convirtiendo errores a NaN
for col in ['P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'P10', 'P11', 'P12']:
    if col in data_fixed.columns:
        data_fixed[col] = pd.to_numeric(data_fixed[col].astype(str).str.replace(r'^\d.', "",
regex=True), errors='coerce')
    else:
        data_fixed[col] = pd.Series([pd.NA] * len(data_fixed))

all_data.append(data_fixed)

except pd.errors.EmptyDataError:
    print(f'Omitiendo archivo sin datos: {file_path}')
except UnicodeDecodeError:
    print(f'Omitiendo archivo con error de codificación: {file_path}')

# Filtrar DataFrames vacíos antes de concatenar
all_data = [df for df in all_data if not df.empty]

# CONCATENAR DATAFRAMES Y CANTIDAD TOTAL DE DATOS DE LA MUESTRA
if all_data:
    all_data = pd.concat(all_data, ignore_index=True)
    total_filas = all_data.shape[0] # Total de filas en all_data
else:
    print("No se encontraron datos que procesar.")
    all_data = pd.DataFrame(columns=column_names)
```

```
total_filas = 0
print(f"Número total de vehiculos en la muestra: {total_filas}")

# VALOR BUSCADO SEGÚN CLASIFICACIÓN MOP
valor_buscado = ['32', '320', '321'] # Buses de 3 ejes clasificación MOP
#valor_buscado = ['21', '210'] # Buses de 2 ejes clasificación MOP

if total_filas > 0:
    filas_encontradas = all_data[all_data['tipo_DV'].isin(valor_buscado)].copy()

    # Inicializar contadores para filas eliminadas
    filas_eliminadas_por_filtro_1 = 0
    filas_eliminadas_por_filtro_2 = 0

    if valor_buscado == ['21', '210']: # BUSES DE 2 EJES
        filas_iniciales = filas_encontradas.copy()

        # Eliminar filas con NaN o 0 en P1 y P2
        filas_encontradas = filas_encontradas.dropna(subset=['P1', 'P2'])
        filas_encontradas = filas_encontradas[(filas_encontradas['P1'] != 0) &
        (filas_encontradas['P2'] != 0)]

        # Contar y mostrar las filas eliminadas por el primer filtro
        filas_eliminadas_por_filtro_1 = len(filas_iniciales) - len(filas_encontradas)
        print(f"Filas eliminadas por el primer filtro (NaN o 0 en P1 y P2):
        {filas_eliminadas_por_filtro_1}")
        print(filas_iniciales.loc[~filas_iniciales.index.isin(filas_encontradas.index)])

    # Guardar una copia de las filas antes del segundo filtro
    filas_iniciales = filas_encontradas.copy()

    # Eliminar filas que no tengan NaN en P3 y en adelante
    cols_from_P3_onwards = ['P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'P10', 'P11', 'P12']
    for col in cols_from_P3_onwards:
```

```
    if col in filas_encontradas.columns:
        filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas[col].isna()]

# Contar y mostrar las filas eliminadas por el segundo filtro
filas_eliminadas_por_filtro_2 = len(filas_iniciales) - len(filas_encontradas)
print(f'Filas eliminadas por el segundo filtro (que tienen valores en P3 en adelante):
{filas_eliminadas_por_filtro_2}')
print(filas_iniciales.loc[~filas_iniciales.index.isin(filas_encontradas.index)])

else:
    # BUSES DE 3 EJES
    filas_iniciales = filas_encontradas.copy()

# Eliminar filas con NaN o 0 en P1, P2 y P3
filas_encontradas = filas_encontradas.dropna(subset=['P1', 'P2', 'P3'])
filas_encontradas = filas_encontradas[(filas_encontradas['P1'] != 0) &
(filas_encontradas['P2'] != 0) & (filas_encontradas['P3'] != 0)]

# Contar y mostrar las filas eliminadas por el primer filtro
filas_eliminadas_por_filtro_1 = len(filas_iniciales) - len(filas_encontradas)
print(f'Filas eliminadas por el primer filtro (NaN o 0 en P1, P2, o P3):
{filas_eliminadas_por_filtro_1}')
print(filas_iniciales.loc[~filas_iniciales.index.isin(filas_encontradas.index)])

# Guardar una copia de las filas antes del segundo filtro
filas_iniciales = filas_encontradas.copy()

# Eliminar filas que no tengan NaN en P4 y en adelante
cols_from_P4_onwards = ['P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'P10', 'P11', 'P12']
for col in cols_from_P4_onwards:
    if col in filas_encontradas.columns:
        filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas[col].isna()]

# Contar y mostrar las filas eliminadas por el segundo filtro
```

```
filas_eliminadas_por_filtro_2 = len(filas_iniciales) - len(filas_encontradas)
print(f'Filas eliminadas por el segundo filtro (que tienen valores en P4 en adelante):
{filas_eliminadas_por_filtro_2}')
print(filas_iniciales.loc[~filas_iniciales.index.isin(filas_encontradas.index)])

# Recalcular el número de buses encontrados después del filtrado
Buses_encontrados = filas_encontradas.shape[0]

if Buses_encontrados > 0:

    # CALCULAR PESO BRUTO
    if valor_buscado == ['21', '210']: # para el caso de buses de 2 ejes
        filas_encontradas['peso_bruto'] = filas_encontradas[['P1', 'P2']].sum(axis=1)
    else:
        filas_encontradas['peso_bruto'] = filas_encontradas[['P1', 'P2', 'P3']].sum(axis=1)

    # FILTRAR BUSES CON PESO BRUTO MENOR A 9 TONELADAS
    filas_iniciales_por_peso_bruto = filas_encontradas.copy()
    filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas['peso_bruto'] >= 9]
    filas_eliminadas_por_peso_bruto = len(filas_iniciales_por_peso_bruto) -
len(filas_encontradas)
    print(f'Filas eliminadas por tener peso bruto menor a 9 toneladas:
{filas_eliminadas_por_peso_bruto}')

    # FILTRAR SEGÚN VELOCIDAD (MÁXIMO 120 KM/H)
    filas_encontradas['vel'] = pd.to_numeric(filas_encontradas['vel'], errors='coerce')
    filas_iniciales_por_velocidad = filas_encontradas.copy()
    filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas['vel'] <= 120]
    filas_eliminadas_por_velocidad = len(filas_iniciales_por_velocidad) -
len(filas_encontradas)
    print(f'Filas eliminadas por tener velocidad mayor a 120:
{filas_eliminadas_por_velocidad}')

    # CALCULAR MÁXIMOS
```

```
max_peso_bruto = round(filas_encontradas['peso_bruto'].max(), 2)
max_row = filas_encontradas.loc[filas_encontradas['peso_bruto'].idxmax(), ['sample',
'fecha']]
max_sample = max_row['sample']
max_fecha = max_row['fecha']
max_valor_P1 = filas_encontradas['P1'].max()
max_valor_P2 = filas_encontradas['P2'].max()
if valor_buscado == ['21', '210']: # para el caso de buses de 2 ejes
    max_valor_P3 = 0
else:
    max_valor_P3 = filas_encontradas['P3'].max()

# CALCULAR PROMEDIOS
prom_P1 = round(filas_encontradas['P1'].mean(), 2)
prom_P2 = round(filas_encontradas['P2'].mean(), 2)
if valor_buscado == ['21', '210']: # para el caso de buses de 2 ejes
    prom_P3 = 0
else: # para el caso de buses de 3 ejes
    prom_P3 = round(filas_encontradas['P3'].mean(), 2)
PBruto_prom = round(prom_P1 + prom_P2 + prom_P3, 2)

# CALCULO DE PERCENTILES Y MODA

# PERCENTILES POR PESO BRUTO
percentil_05 = filas_encontradas['peso_bruto'].quantile(0.05)
percentil_25 = filas_encontradas['peso_bruto'].quantile(0.25)
percentil_50 = filas_encontradas['peso_bruto'].quantile(0.50)
percentil_95 = filas_encontradas['peso_bruto'].quantile(0.95)
moda_peso_bruto = filas_encontradas['peso_bruto'].mode()

# PERCENTILES PESO POR EJE

if valor_buscado == ['21', '210']: # para el caso de buses de 2 ejes
    percentil_05_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.05)
```

```
percentil_25_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.25)
percentil_50_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.50)
percentil_95_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.95)
percentil_05_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.05)
percentil_25_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.25)
percentil_50_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.50)
percentil_95_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.95)
```

else:

```
percentil_05_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.05)
percentil_25_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.25)
percentil_50_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.50)
percentil_95_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.95)
percentil_05_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.05)
percentil_25_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.25)
percentil_50_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.50)
percentil_95_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.95)
percentil_05_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.05)
percentil_25_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.25)
percentil_50_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.50)
percentil_95_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.95)
```

```
# CANTIDAD DE BUSES CON ERRORES
```

```
filas_con_errores = filas_eliminadas_por_filtro_1 + filas_eliminadas_por_filtro_2
```

```
print(f'El número de mediciones con errores es: {filas_con_errores}')
```

```
# PRINT MÁXIMOS Y CANTIDAD DE BUSES
```

```
fr_Total_Buses = round(100 * Buses_encontrados / total_filas, 2)
```

```
print(f'El número de buses interurbanos de la muestra es: {Buses_encontrados}, que  
equivale a un {fr_Total_Buses}% del total')
```

```
print(f'El valor del peso bruto máximo es: {max_peso_bruto} T, en la muestra  
{max_sample} del día {max_fecha}')
```

```
print(f'El peso máximo del eje frontal de la muestra es: {max_valor_P1} T')
```

```
print(f'El peso máximo del eje 2 de la muestra es: {max_valor_P2} T')
```

```
print(f'El peso máximo del eje 3 de la muestra es: {max_valor_P3} T")
# PRINT PERCENTILES Y PESO BRUTO
print(f'El percentil 05 del peso bruto es: {percentil_05:.2f} T")
print(f'El percentil 25 del peso bruto es: {percentil_25:.2f} T")
print(f'El percentil 50 (mediana) del peso bruto es: {percentil_50:.2f} T")
print(f'El percentil 95 del peso bruto es: {percentil_95:.2f} T")
print(f'El percentil 95 del eje 1 es: {percentil_95_P1:.2f} T")
print(f'El percentil 95 del eje 2 es: {percentil_95_P2:.2f} T")
if valor_buscado == ['21', '210']: # para el caso de buses de 2 ejes
    print(f' No hay eje 3")
else:
    print(f'El percentil 95 del eje 3 es: {percentil_95_P3:.2f} T")

if len(modas_peso_bruto) > 1:
    print(f'Las modas del peso bruto son: {', '.join(map(lambda x: f'{x:.2f}',
modas_peso_bruto))} T")
else:
    print(f'La moda del peso bruto es: {modas_peso_bruto[0]:.2f} T")

# PRINT PROMEDIOS Y FILAS DE EJEMPLO
print(f'El promedio de los pesos P1, P2 y P3 de la muestra es: {prom_P1} T, {prom_P2} T
y {prom_P3} T")
print(f'El promedio del peso bruto de la muestra es: {PBruto_prom} T")
filas_encontradas = filas_encontradas.sort_values(by='peso_bruto', ascending=False)

print(filas_encontradas.head(25))
print(filas_encontradas.tail(25))

output_txt_file_path = 'filas_encontradas_320y321_Cu12-2018.txt'

with open(output_txt_file_path, 'w', encoding='utf-8') as f:

    for index, row in filas_encontradas.iterrows():
        f.write("\t".join(map(str, row.values)) + "\n")
```

```

print(f"Todas las filas encontradas se han exportado correctamente a
{output_txt_file_path}")

# EXPORTAR RESULTADOS A EXCEL
#resultados = {
#Descripción': ['Cantidad de buses','percentil 05 eje 1', 'Percentil 05 eje 2', 'Percentil 05 eje
3', 'Percentil 25 eje 1',
#      'Percentil 25 eje 2', 'Percentil 25 eje 3', 'Percentil 50 eje 1', 'Percentil 50 eje 2',
#      'Percentil 50 eje 3', 'Percentil 95 eje 1', 'Percentil 95 eje 2',
#      'Percentil 95 eje 3','Máximo eje 1','Máximo eje 2','Máximo eje 3'],
#Valor': [Buses_encontrados ,percentil_05_P1, percentil_05_P2, percentil_05_P3,
percentil_25_P1,
#      percentil_25_P2, percentil_25_P3, percentil_50_P1, percentil_50_P2,
#      percentil_50_P3, percentil_95_P1, percentil_95_P2, percentil_95_P3,
#      max_valor_P1, max_valor_P2, max_valor_P3]
#}
#resultados = {
#Descripción': ['Cantidad de buses','percentil 05 eje 1', 'Percentil 05 eje 2', 'Percentil 25 eje
1',
#      #Percentil 25 eje 2', 'Percentil 50 eje 1', 'Percentil 50 eje 2',
#      #Percentil 95 eje 1', 'Percentil 95 eje 2',
#      #'Máximo eje 1','Máximo eje 2'],
#Valor': [Buses_encontrados ,percentil_05_P1, percentil_05_P2, percentil_25_P1,
#percentil_25_P2, percentil_50_P1, percentil_50_P2,
#percentil_95_P1, percentil_95_P2,
#max_valor_P1, max_valor_P2,]
#}

#df_resultados = pd.DataFrame(resultados)

# Especifica la ruta de salida del archivo Excel
#output_file_path = 'percentiles_por_eje_320y321_Cu12-2018.xlsx'

```

```
# Exportar el DataFrame a Excel
#df_resultados.to_excel(output_file_path, sheet_name='Resumen Resultados', index=False)

#print(f"Los resultados específicos se han exportado correctamente a {output_file_path}")

else:
    print("No se encontraron buses en la muestra que cumplan con el valor buscado.")
else:
    print("No se encontraron datos que procesar.")
```

ANEXO 3.2: Código identificación y control de calidad de datos año 2022

```
import pandas as pd
import glob

folder_path = 'D:\\YEAR\\SELECTIVA\\2022\\Curacavi\\Cu-12\\'
file_pattern = folder_path + '*.TXT'
file_paths = glob.glob(file_pattern)
all_data = []
column_names = ['sample', 'unknown1', 'fecha', 'hora', 'vel', 'largo', 'tipo_DV', 'X1', 'X2', 'msg',
                'estacion',
                'P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'peso_bruto']

# Inicializar contador de filas total y contadores de filas eliminadas
total_filas = 0
total_eliminadas_por_filtro_1 = 0
total_eliminadas_por_filtro_2 = 0
total_eliminadas_por_peso_bruto = 0 # Inicializar contador de filas eliminadas por peso bruto
total_eliminadas_por_velocidad = 0 # Inicializar contador de filas eliminadas por velocidad
filas_eliminadas_filtro_1 = [] # Lista para almacenar filas eliminadas por el primer filtro
filas_eliminadas_filtro_2 = [] # Lista para almacenar filas eliminadas por el segundo filtro

# Leer y procesar cada archivo
for file_path in file_paths:
    data_raw = pd.read_csv(file_path, sep=r'\n', header=None, engine='python')

    # Actualizar el contador de filas total antes del filtrado
    total_filas += data_raw.shape[0]

    data_fixed = data_raw[0].str.split(';', expand=True)

    data_fixed = data_fixed.dropna(axis=1, how='all')
    data_fixed.columns = column_names[:len(data_fixed.columns)]
```

```
data_fixed['tipo_DV'] = data_fixed['tipo_DV'].astype(str).str.strip().str.replace(r'[^\w]', "",
regex=True)

for col in ['P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9']:
    data_fixed[col] = pd.to_numeric(data_fixed[col].astype(str).str.replace(r'[^\d.]', "",
regex=True), errors='coerce')

# VALOR BUSCADO SEGÚN CLASIFICACIÓN MOP
#valor_buscado = ['32', '320', '321']
valor_buscado = ['21', '210']
filas_encontradas = data_fixed[data_fixed['tipo_DV'].isin(valor_buscado)].copy()

# Guardar el número de filas antes del filtrado
filas_iniciales = len(filas_encontradas)

# Aplicación de filtros
if valor_buscado == ['21', '210']: # BUSES DE 2 EJES
    # Eliminar filas con NaN o 0 en P1 y P2
    filas_eliminadas_filtro_1.extend(filas_encontradas[(filas_encontradas['P1'].isna() |
(filas_encontradas['P2'].isna() |
(filas_encontradas['P1'] == 0) | (filas_encontradas['P2'] ==
0)].values.tolist())

    filas_encontradas = filas_encontradas.dropna(subset=['P1', 'P2'])
    filas_encontradas = filas_encontradas[(filas_encontradas['P1'] != 0) &
(filas_encontradas['P2'] != 0)]

# Contar filas eliminadas por el primer filtro
eliminadas_por_filtro_1 = filas_iniciales - len(filas_encontradas)
total_eliminadas_por_filtro_1 += eliminadas_por_filtro_1

# Guardar el número de filas antes del segundo filtrado
filas_iniciales = len(filas_encontradas)
```

```
# Eliminar filas que tengan valores distintos de 0 en P3 y en adelante (P3 a P9)
cols_from_P3_onwards = ['P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9']
for col in cols_from_P3_onwards:
    if col in filas_encontradas.columns:
        filas_eliminadas_filtro_2.extend(filas_encontradas[filas_encontradas[col] !=
0].values.tolist())
        filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas[col] == 0]

# Contar filas eliminadas por el segundo filtro
eliminadas_por_filtro_2 = filas_iniciales - len(filas_encontradas)
total_eliminadas_por_filtro_2 += eliminadas_por_filtro_2

else: # BUSES DE 3 EJES
    # Eliminar filas con NaN o 0 en P1, P2 y P3
    filas_eliminadas_filtro_1.extend(filas_encontradas[(filas_encontradas['P1'].isna() |
(filas_encontradas['P2'].isna()) | (filas_encontradas['P3'].isna()) |
        (filas_encontradas['P1'] == 0) | (filas_encontradas['P2'] ==
0) | (filas_encontradas['P3'] == 0)].values.tolist())

    filas_encontradas = filas_encontradas.dropna(subset=['P1', 'P2', 'P3'])
    filas_encontradas = filas_encontradas[(filas_encontradas['P1'] != 0) &
(filas_encontradas['P2'] != 0) & (filas_encontradas['P3'] != 0)]

# Contar filas eliminadas por el primer filtro
eliminadas_por_filtro_1 = filas_iniciales - len(filas_encontradas)
total_eliminadas_por_filtro_1 += eliminadas_por_filtro_1

# Guardar el número de filas antes del segundo filtrado
filas_iniciales = len(filas_encontradas)

# Eliminar filas que tengan valores distintos de 0 en P4 y en adelante (P4 a P9)
cols_from_P4_onwards = ['P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9']
for col in cols_from_P4_onwards:
    if col in filas_encontradas.columns:
```

```
filas_eliminadas_filtro_2.extend(filas_encontradas[filas_encontradas[col] !=
0].values.tolist())
filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas[col] == 0]

# Contar filas eliminadas por el segundo filtro
eliminadas_por_filtro_2 = filas_iniciales - len(filas_encontradas)
total_eliminadas_por_filtro_2 += eliminadas_por_filtro_2

# Recalcular el peso bruto después de aplicar los filtros
if set(valor_buscado) == {'21', '210'}: # para el caso de buses de 2 ejes
    filas_encontradas['peso_bruto'] = filas_encontradas[['P1', 'P2']].sum(axis=1)
else:
    filas_encontradas['peso_bruto'] = filas_encontradas[['P1', 'P2', 'P3']].sum(axis=1)

# FILTRAR BUSES CON PESO BRUTO MENOR A 9 TONELADAS
filas_iniciales_por_peso_bruto = filas_encontradas.copy()
filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas['peso_bruto'] >= 9000]
filas_eliminadas_por_peso_bruto = len(filas_iniciales_por_peso_bruto) -
len(filas_encontradas)
total_eliminadas_por_peso_bruto += filas_eliminadas_por_peso_bruto

# FILTRAR SEGÚN VELOCIDAD
filas_encontradas['vel'] = pd.to_numeric(filas_encontradas['vel'], errors='coerce')
filas_iniciales_por_velocidad = filas_encontradas.copy()
filas_encontradas = filas_encontradas[filas_encontradas['vel'] <= 120]
filas_eliminadas_por_velocidad = len(filas_iniciales_por_velocidad) - len(filas_encontradas)
total_eliminadas_por_velocidad += filas_eliminadas_por_velocidad

# Append processed data to all_data list
all_data.append(filas_encontradas)

# Concatenar todos los DataFrames en uno solo
all_data = pd.concat(all_data, ignore_index=True)
```

```
# Mostrar el número total de filas eliminadas por cada filtro
print(f"Total de filas eliminadas por el primer filtro en todos los archivos:
{total_eliminadas_por_filtro_1}")
print(f"Total de filas eliminadas por el segundo filtro en todos los archivos:
{total_eliminadas_por_filtro_2}")
print(f"Total de filas eliminadas por tener peso bruto menor a 9 toneladas:
{total_eliminadas_por_peso_bruto}")
print(f"Total de filas eliminadas por tener velocidad mayor a 120:
{total_eliminadas_por_velocidad}")

# Imprimir las filas eliminadas por cada filtro
print("Filas eliminadas por el primer filtro:")
print(pd.DataFrame(filas_eliminadas_filtro_1, columns=column_names))

print("Filas eliminadas por el segundo filtro:")
print(pd.DataFrame(filas_eliminadas_filtro_2, columns=column_names))

# MÁXIMOS Y CANTIDAD DE BUSES
print(f"El número total de vehículos en la muestra: {total_filas}")
Buses_encontrados = all_data.shape[0]
max_peso_bruto = all_data['peso_bruto'].max() # máximo 23000 kilos (321)
max_row = all_data.loc[all_data['peso_bruto'].idxmax(), ['sample', 'fecha']] # Fecha y Sample
del peso bruto máximo
max_sample = max_row['sample']
max_fecha = max_row['fecha']
max_valor_P1 = all_data['P1'].max() # eje frontal, máximo 7000 kilos (321)
max_valor_P2 = all_data['P2'].max() # ejes traseros, máximo entre ambos 16000 kilos (321)
max_valor_P3 = all_data['P3'].max() if set(valor_buscado) != {'21', '210'} else 0

# CALCULO DE PERCENTILES Y MODA
percentil_05 = all_data['peso_bruto'].quantile(0.05)
percentil_25 = all_data['peso_bruto'].quantile(0.25)
```

```
percentil_50 = all_data['peso_bruto'].quantile(0.50)
percentil_95 = all_data['peso_bruto'].quantile(0.95)
moda_peso_bruto = all_data['peso_bruto'].mode()

# PERCENTILES PESO POR EJE

if valor_buscado == ['21', '210']: # para el caso de buses de 2 ejes
    percentil_05_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.05)
    percentil_25_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.25)
    percentil_50_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.50)
    percentil_95_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.95)
    percentil_05_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.05)
    percentil_25_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.25)
    percentil_50_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.50)
    percentil_95_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.95)
else:
    percentil_05_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.05)
    percentil_25_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.25)
    percentil_50_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.50)
    percentil_95_P1 = filas_encontradas['P1'].quantile(0.95)
    percentil_05_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.05)
    percentil_25_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.25)
    percentil_50_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.50)
    percentil_95_P2 = filas_encontradas['P2'].quantile(0.95)
    percentil_05_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.05)
    percentil_25_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.25)
    percentil_50_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.50)
    percentil_95_P3 = filas_encontradas['P3'].quantile(0.95)

# PROMEDIOS
prom_P1 = round(all_data['P1'].mean(), 2)
prom_P2 = round(all_data['P2'].mean(), 2)
prom_P3 = round(all_data['P3'].mean(), 2) if set(valor_buscado) != {'21', '210'} else 0
```

```
PBruto_prom = round(prom_P1 + prom_P2 + prom_P3, 2)

# PRINT MÁXIMOS
fr_Total_Buses = round(100 * Buses_encontrados / total_filas, 2)
print(f'El número de buses interurbanos de la muestra es: {Buses_encontrados}, que equivale a
un {fr_Total_Buses}% del total")
print(f'El valor del peso bruto máximo es: {max_peso_bruto} kg, en la muestra {max_sample}
del día {max_fecha}")
print(f'El peso máximo del eje frontal de la muestra es: {max_valor_P1} kg")
print(f'El peso máximo del eje 2 de la muestra es: {max_valor_P2} kg")
print(f'El peso máximo del eje 3 de la muestra es: {max_valor_P3} kg")

# PRINT PERCENTILES Y PESO BRUTO
print(f'El percentil 05 del peso bruto es: {percentil_05:.2f} kg")
print(f'El percentil 25 del peso bruto es: {percentil_25:.2f} kg")
print(f'El percentil 50 (mediana) del peso bruto es: {percentil_50:.2f} kg")
print(f'El percentil 95 del peso bruto es: {percentil_95:.2f} kg")
if len(modas_peso_bruto) > 1:
    print(f'Las modas del peso bruto son: {', '.join(map(lambda x: f'{x:.2f}', modas_peso_bruto))}
kg")
else:
    print(f'La moda del peso bruto es: {modas_peso_bruto[0]:.2f} kg")

# PRINT PROMEDIOS
print(f'El promedio de los pesos P1, P2 y P3 de la muestra es: {prom_P1} kg, {prom_P2} kg y
{prom_P3} kg")
print(f'El promedio del peso bruto de la muestra es: {PBruto_prom} kg")
all_data = all_data.sort_values(by='peso_bruto', ascending=False)
print(all_data.head(25)[['sample', 'fecha', 'hora', 'vel', 'largo', 'tipo_DV', 'P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5',
'peso_bruto']])
print(all_data.tail(25)[['sample', 'fecha', 'hora', 'vel', 'largo', 'tipo_DV', 'P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5',
'peso_bruto']])

# Especifica la ruta de salida del archivo txt
```

```
output_txt_file_path = 'filas_encontradas_210_Cu12-2022.txt'

# Guardar todas las filas encontradas en el archivo txt
with open(output_txt_file_path, 'w', encoding='utf-8') as f:
    # Guardar cada fila
    for index, row in all_data.iterrows(): # Cambié filas_encontradas a all_data para guardar todas
las filas
        f.write("\t".join(map(str, row.values)) + "\n")

print(f"Todas las filas encontradas se han exportado correctamente a {output_txt_file_path}")

# EXPORTAR RESULTADOS A EXCEL
#resultados = {
# 'Descripción': ['Cantidad de buses','percentil 05 eje 1', 'Percentil 05 eje 2', 'Percentil 05 eje 3',
'Percentil 25 eje 1',
# 'Percentil 25 eje 2', 'Percentil 25 eje 3', 'Percentil 50 eje 1', 'Percentil 50 eje 2',
# 'Percentil 50 eje 3', 'Percentil 95 eje 1', 'Percentil 95 eje 2',
# 'Percentil 95 eje 3','Máximo eje 1','Máximo eje 2','Máximo eje 3'],
# 'Valor': [Buses_encontrados ,percentil_05_P1, percentil_05_P2, percentil_05_P3,
percentil_25_P1,
# percentil_25_P2, percentil_25_P3, percentil_50_P1, percentil_50_P2,
# percentil_50_P3, percentil_95_P1, percentil_95_P2, percentil_95_P3,
# max_valor_P1, max_valor_P2, max_valor_P3]
#}
#resultados = {
# 'Descripción': ['Cantidad de buses','percentil 05 eje 1', 'Percentil 05 eje 2', 'Percentil 25 eje 1',
# 'Percentil 25 eje 2', 'Percentil 50 eje 1', 'Percentil 50 eje 2',
# 'Percentil 95 eje 1', 'Percentil 95 eje 2',
# 'Máximo eje 1','Máximo eje 2'],
# 'Valor': [Buses_encontrados ,percentil_05_P1, percentil_05_P2, percentil_25_P1,
# percentil_25_P2, percentil_50_P1, percentil_50_P2,
# percentil_95_P1, percentil_95_P2,
# max_valor_P1, max_valor_P2,]
#}
```

```
#df_resultados = pd.DataFrame(resultados)

# Especifica la ruta de salida del archivo Excel
#output_file_path = 'percentiles_por_eje_210_Cu12-2022.xlsx'

# Exportar el DataFrame a Excel
#df_resultados.to_excel(output_file_path, sheet_name='Resumen Resultados', index=False)

#print(f'Los resultados específicos se han exportado correctamente a {output_file_path}')
```

ANEXO 3.3: Código cálculos de momento y corte 2016 al 2019

A continuación se presenta el código utilizado para calcular los momentos y los cortes en los años 2016 al 2019, dicho código está en función de la base de datos de dos ejes, por lo que es necesario modificarlo si se desea trabajar con vehículos de más ejes, mientras que para el caso del año 2022 es necesario modificar el código para dividir por 1000 las cargas ya que estas se encuentran en kilos debido al cambio de formato mencionado en el Capítulo 3: EFECTOS A FLEXIÓN, CORTE Y FATIGA PRODUCTO DEL TRÁFICO DE BUSES.

```
import numpy as np
import pandas as pd
from tqdm import tqdm # Para mostrar progreso

# Leer el archivo txt con la base de datos filtrada
file_path =
columns = ['ID', 'Fecha', 'Hora', 'Vel', 'tipo_DV', 'msg', 'largo', 'estacion', 'P1', 'P2', 'nan1', 'nan2',
'nan3', 'nan4', 'nan5', 'nan6', 'nan7', 'nan8', 'nan9', 'nan10', 'peso_bruto']
data = pd.read_csv(file_path, sep='\t', names=columns)

# Funciones para el cálculo de corte y momento
def mapping(L, DL):
    X = np.arange(0, L+DL, DL)
    return X

def shear_and_moment_diagrams(X, P, a):
    L = X[-1]
    R_left = P*(L-a)/L
    R_right = P*a/L
    V = []
    M = []
    if a < L:
        for x in X:
            if x <= a:
                m = R_left * x
```

```

        v = R_left
    else:
        m = R_left * x - P * (x-a)
        v = -R_right
    M.append(m)
    V.append(v)
M = np.array(M)
V = np.array(V)
else:
    M = np.zeros_like(X)
    V = np.zeros_like(X)
return M, V

def solveIt(L, DL, Load, Spacing, Truck_Pos):
    X = mapping(L, DL)
    Spacing = np.array(Spacing)
    Loc_Pos = np.cumsum(Spacing)
    SumM = 0
    SumV = 0
    for i in range(len(Load)):
        M, V = shear_and_moment_diagrams(X, P=Load[i], a=Truck_Pos+Loc_Pos[i])
        SumM = SumM + M
        SumV = SumV + V
    return SumV, SumM

# Parámetros de longitud de viga y discretización
beam_length = 50
DL = 0.10
spacing = [0, 6.5] # espaciamiento entre ejes medido desde el eje anterior

# Para almacenar los resultados
results = []

```

```
# Iterar sobre las filas del archivo y calcular cortante y momento para una longitud de viga
específica
for index, row in tqdm(data.iterrows(), total=len(data), desc="Procesando filas", unit="fila"):
    load_values = [row['P1'], row['P2']]

    # Calcular corte y momento para la viga especificada
    X = mapping(beam_length, DL)
    truck_positions = mapping(beam_length, DL)
    Mmax = float('-inf')
    Vmax = float('-inf')

    for position in truck_positions:
        V, M = solveIt(beam_length, DL, load_values, spacing, position)
        Mmax = max(Mmax, np.max(M))
        Vmax = max(Vmax, np.max(np.abs(V)))

    # Guardar los resultados
    results.append({
        'ID': row['ID'],
        'Beam Length': beam_length,
        'Max Moment': Mmax,
        'Max Shear': Vmax
    })

# Convertir los resultados en un DataFrame para visualización
results_df = pd.DataFrame(results)

# Mostrar los resultados
print(results_df)

# Guardar los resultados en un archivo Excel
results_df.to_excel('resultados_210_Cu12_50m-2019+350kg.xlsx', index=False)
```

ANEXO 3.4: Código cálculo TMDA pesado 2016 al 2019

```
import os

import pandas as pd

# Ruta de la carpeta .dat

folder_path = 'D:\\YEAR\\SELECTIVA\\2019\\Curacavi\\Cu-34\\'

# Crear contadores y listas

total_valid_rows = 0

discarded_count = 0

dat_files_count = 0

empty_files_count = 0

incomplete_hours_count = 0

complete_hours_files_count = 0

valid_rows_in_complete_files = 0

incomplete_files_info = []

# Columnas

column_names = ['sample', 'fecha', 'hora', 'vel', 'tipo_DV', 'msg', 'largo', 'estacion',

                'P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'P10', 'P11', 'P12']

# Procesar cada archivo .dat en la carpeta

for file_name in os.listdir(folder_path):

    if file_name.lower().endswith(".dat"):
```

```
file_path = os.path.join(folder_path, file_name)

# Verificar si el archivo está vacío o solo tiene encabezados

with open(file_path, 'r') as file:

    lines = file.readlines()

    if len(lines) <= 1:

        empty_files_count += 1

        continue

# Si no está vacío, procesarlo

dat_files_count += 1 # Incrementar contador de archivos procesados

# Leer el archivo

try:

    df = pd.read_csv(file_path, names=column_names, skiprows=1, delimiter=',')

except Exception as e:

    print(f"Error al leer el archivo {file_name}: {e}")

    continue

# Verificar que las columnas sean numéricas

cols_to_sum = ['P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'P10', 'P11', 'P12']

df[cols_to_sum] = df[cols_to_sum].apply(pd.to_numeric, errors='coerce')

# Cálculo peso bruto

df['peso_bruto'] = df[cols_to_sum].sum(axis=1)
```

```
# Filtrar peso_bruto >= 9

valid_df = df[df['peso_bruto'] >= 9]

# Contar filas válidas y descartadas

discarded_count += len(df) - len(valid_df)

total_valid_rows += len(valid_df)

# Verificar si la columna 'hora' está presente y procesar horas únicas

if 'hora' in df.columns:

    # Extraer solo la hora en formato `HH` de `HH:MM`

    df['hora'] = df['hora'].astype(str).str.split(':').str[0] # Extraer la hora

    df['hora'] = pd.to_numeric(df['hora'], errors='coerce') # Convertir a numérico

    unique_hours = df['hora'].dropna().astype(int).unique() # Obtener horas únicas como
enteros

    missing_hours = sorted(set(range(24)) - set(unique_hours)) # Comparar con el rango
completo de horas

    if not missing_hours:

        complete_hours_files_count += 1

        valid_rows_in_complete_files += len(valid_df) # ADTT CON DIAS COMPLETOS

    else:

        incomplete_hours_count += 1

        incomplete_files_info.append({"archivo": file_name, "horas_faltantes":
missing_hours})

    else:
```

```
incomplete_hours_count += 1

incomplete_files_info.append({"archivo": file_name, "horas_faltantes": "No contiene
columna 'hora'"})

# Calcular promedios

average_valid_rows = total_valid_rows / dat_files_count if dat_files_count > 0 else 0

average_valid_rows_complete_files = valid_rows_in_complete_files /
complete_hours_files_count if complete_hours_files_count > 0 else 0

# Imprimir los resultados generales

print(f'Proceso completado.')

print(f'Total de archivos en la carpeta: {dat_files_count + empty_files_count}')

print(f'Días con registros: {dat_files_count}')

print(f'Días sin registros: {empty_files_count}')

print(f'Vehículos pesados: {total_valid_rows}')

print(f'Vehículos con peso menor a 9T: {discarded_count}')

print(f'ADTT calculado (todos los archivos): {average_valid_rows:.2f}')

print(f'ADTT calculado (solo con dias completos): {average_valid_rows_complete_files:.2f}')

print(f'Archivos sin todas las horas (incompletos): {incomplete_hours_count}')

print(f'Vehículos pesados en dias completos: {valid_rows_in_complete_files}')

# Detalles de archivos con dias incompletos

if incomplete_files_info:

    print("\nDetalles de archivos con horas incompletas:")

    for info in incomplete_files_info:
```

```
print(f'Archivo: {info['archivo']}, Horas faltantes: {info['horas_faltantes']}')
```

ANEXO 3.5: Código cálculo TMDA pesado 2022

```
import os

import pandas as pd

# Ruta de la carpeta que contiene los archivos

folder_path = 'D:\\YEAR\\SELECTIVA\\2022\\Curacavi\\Cu-34\\'

# Crear contadores y listas

total_valid_rows = 0

discarded_count = 0

txt_files_count = 0 # Contador de archivos .txt

empty_files_count = 0

incomplete_hours_count = 0

complete_hours_files_count = 0

valid_rows_in_complete_files = 0

incomplete_files_info = []

# Nombres de las columnas ajustadas

column_names = ['sample', 'unknown1', 'fecha', 'hora', 'vel', 'largo', 'tipo_DV', 'X1', 'X2', 'msg',
'estacion',

                'P1', 'P2', 'P3', 'P4', 'P5', 'P6', 'P7', 'P8', 'P9', 'peso_bruto']

# Procesar cada archivo .txt en la carpeta

for file_name in os.listdir(folder_path):

    if file_name.lower().endswith(".txt"):
```

```
file_path = os.path.join(folder_path, file_name)

# Verificar si el archivo está vacío o solo tiene encabezados

with open(file_path, 'r') as file:

    lines = file.readlines()

    if len(lines) <= 1:

        empty_files_count += 1

        continue

# Si no está vacío, procesarlo

txt_files_count += 1

# Leer el archivo con el delimitador `;`

try:

    df = pd.read_csv(file_path, names=column_names, skiprows=1, delimiter=';')

except Exception as e:

    print(f"Error al leer el archivo {file_name}: {e}")

    continue

# Asegurarse de que la columna `peso_bruto` sea numérica

df['peso_bruto'] = pd.to_numeric(df['peso_bruto'], errors='coerce')

# Filtrar peso_bruto >= 9000

valid_df = df[df['peso_bruto'] >= 9000]

discarded_count += len(df) - len(valid_df)
```

```
total_valid_rows += len(valid_df)

# Procesar la columna `hora`

if 'hora' in df.columns:

    df['hora'] = df['hora'].astype(str).str.split(':').str[0] # Extraer la hora `HH`

    df['hora'] = pd.to_numeric(df['hora'], errors='coerce') # Convertir a numérico

    unique_hours = df['hora'].dropna().astype(int).unique() # Obtener horas únicas

    missing_hours = sorted(set(range(24)) - set(unique_hours)) # Verificar horas faltantes

    if not missing_hours: # Si no faltan horas

        complete_hours_files_count += 1

        valid_rows_in_complete_files += len(valid_df)

    else:

        incomplete_hours_count += 1

        incomplete_files_info.append({"archivo": file_name, "horas_faltantes":
missing_hours})

    else:

        incomplete_hours_count += 1

        incomplete_files_info.append({"archivo": file_name, "horas_faltantes": "No contiene
columna 'hora'"})

# Calcular promedios

average_valid_rows = total_valid_rows / txt_files_count if txt_files_count > 0 else 0

average_valid_rows_complete_files = valid_rows_in_complete_files /
complete_hours_files_count if complete_hours_files_count > 0 else 0
```

```
# Imprimir resultados

print(f"Proceso completado.")

print(f"Total de archivos en la carpeta: {txt_files_count + empty_files_count}")

print(f"Días con registros: {txt_files_count}")

print(f"Días sin registros: {empty_files_count}")

print(f"Vehículos pesados: {total_valid_rows}")

print(f"Vehículos con peso menor a 9 toneladas: {discarded_count}")

print(f"ADTT calculado (todos los archivos): {average_valid_rows:.2f}")

print(f"ADTT calculado (solo días completos): {average_valid_rows_complete_files:.2f}")

print(f"Archivos sin todas las horas (incompletos): {incomplete_hours_count}")

print(f"Vehículos pesados en días completos: {valid_rows_in_complete_files}")

if incomplete_files_info:

    print("\nDetalles de archivos con horas incompletas:")

    for info in incomplete_files_info:

        print(f"Archivo: {info['archivo']}, Horas faltantes: {info['horas_faltantes']}")
```

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil
Carrera	: Ingeniería Civil
Nombre del memorista	: Agustín Villanueva Suárez
Título de la memoria	: Efectos del aumento del peso del eje frontal de buses interurbanos en puentes simplemente apoyados
Fecha de la presentación oral	: 25/03/2025
Profesor(es) Guía	: Víctor Hugo Aguilar Vidal
Profesor(es) Revisor(es)	: Tomas Benjamín Echaveguren Navarro
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

El transporte terrestre de personas vía buses interurbanos es de gran relevancia para la conectividad nacional. Debido a medidas de seguridad adicionales que se les están exigiendo a las empresas de transporte, principalmente en la cabina de los buses el peso del eje frontal de los buses interurbanos podría aumentar 350 kilogramos. Esta memoria tiene por objetivo evaluar efectos estructurales de este potencial aumento del peso del eje frontal de buses interurbanos en puentes, para aportar con información relevante a los organismos tomadores de decisión.

Utilizando datos de la estación de pesaje Curacaví se determinaron los efectos estructurales: (1) momentos flectores; (2) fuerzas cortantes; y, (3) deterioro por fatiga, generados por buses interurbanos de eje frontal simple en puentes simplemente apoyados menores y medianos. Se compararon las demandas de momento flector y fuerza cortante antes y después del aumento de peso. Además, se compararon las demandas considerando el peso adicional con los patrones de cargas utilizados en el diseño. Finalmente se realizó un análisis de deterioro y disminución de la vida útil de un puente tipo producto del aumento de peso.

En los tres aspectos evaluados se obtuvieron mínimas variaciones respecto del caso base. Los aumentos porcentuales de la demanda a momento y corte respecto del original fueron en promedio del 2% en los casos más desfavorables. Se determinó que la gran mayoría de buses interurbanos, con excepción de algunos pocos *outliers*, siguen estando dentro de la demanda de diseño esperada por ambos patrones de carga. Finalmente, el análisis de deterioro entregó que la vida útil del puente tipo evaluado se redujo aproximadamente de un 0,97%, lo que se traduce en alrededor de 9 meses menos de vida útil respecto de los 75 años que se proyectan.