

GUÍA PARA EL USO DE CIFRAS SIGNIFICATIVAS Y EL REDONDEO EN LA VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LAS ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN

INV E – 823 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma brinda un procedimiento para el redondeo de las cifras significativas usadas en los valores observados o calculados que se informan con el fin verificar el cumplimiento de los límites de una especificación de construcción.

2 TERMINOLOGÍA

- 2.1** *Valor observado* – Valor obtenido al hacer una observación.
- 2.2** *Cifra significativa (dígito significativo)* – Cualquiera de los números entre 0 y 9 que denote una cantidad numérica, excepto ceros al comienzo y algunos ceros finales en una fracción decimal, que se usan con su lugar para denotar una cantidad numérica con una aproximación deseada.
- 2.3** *Uso de ceros* – El dígito cero puede indicar un valor específico o indicar un lugar solo, en acuerdo con las siguientes guías:
- 2.3.1** Ceros al comienzo antes del primer dígito diferente de cero de un número, indican solo orden de magnitud y no son dígitos significativos. Por ejemplo, el número “0.0054”, tiene dos cifras significativas.
- 2.3.2** Ceros finales tras el último dígito diferente de cero, para números representados con un punto decimal, son cifras significativas. Por ejemplo, “1370.” y “25.00”, tienen cuatro cifras significativas.
- 2.3.3** El significado de ceros finales en números representados sin el uso de un punto decimal, solo puede ser identificado a partir del conocimiento de la procedencia del valor. Por ejemplo, un módulo resiliente de “140 000 Pa” puede tener desde dos hasta seis cifras significativas. Para eliminar la ambigüedad, se debe emplear una notación exponencial. Así, “ 1.40×10^5 Pa” indica que el módulo se

debe reportar al más cercano " 0.01×10^5 Pa" o "1000 Pa". Se recomienda el uso de prefijos del sistema internacional (SI) para reducir la necesidad de ceros finales de significación desconocida. Así "140 kPa" (sin el punto decimal) puede indicar que el módulo se ha reportado con aproximación a 10 o a 1 kPa, lo que resulta ambiguo con respecto al número de cifras significativas. Sin embargo, "0.140 MPa" indica claramente que el módulo se informa al más cercano "1 kPa", mientras "0.14 MPa" indica claramente que el módulo se informa al más cercano "10 kPa".

- 2.4** *Resultado de ensayo* – Valor de una característica, obtenido al aplicar un método de ensayo especificado.
- 2.5** *Condiciones de repetibilidad* – Condiciones bajo las cuales los resultados de ensayos independientes se obtienen empleando el mismo método sobre muestras idénticas en el mismo laboratorio, por medio del mismo operador y empleando el mismo equipo, dentro de un período de tiempo reducido.
- 2.6** *Desviación estándar de la repetibilidad (s_r)* – La desviación estándar de los resultados de los ensayos obtenidos bajo condiciones de repetibilidad.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** El procedimiento descrito en esta norma aplica a todos los límites especificados en las especificaciones. Para los propósitos de determinar el cumplimiento de los límites especificados, un valor calculado u observado debe ser redondeado a la unidad más cercana en el último dígito de la derecha usado para expresar el límite de la especificación. El valor calculado u observado se debe redondear de acuerdo con el procedimiento descrito en la Sección 5 de esta norma.
- 3.2** El método del redondeo aplica cuando se intenta que un número limitado de dígitos en un valor observado o calculado sean considerados significativos con el propósito de determinar la conformidad con las especificaciones.
- 3.3** Con el método de redondeo, un valor observado o calculado se debe redondear a la unidad más próxima en el lugar señalado de cifras según lo establezca la norma o especificación como, por ejemplo, "al kPa más cercano", "con aproximación a 0.1 %", etc. Entonces, el valor redondeado se deberá comparar con el límite especificado, y la conformidad o no conformidad con la especificación se basará en esta comparación.

4 MANERA DE EXPRESAR EL REDONDEO

- 4.1** Si el método del redondeo se va a aplicar en todos los límites especificados en una norma o especificación, y si todos los dígitos expresados en el límite de la especificación se van a considerar significativos, esto se puede indicar incluyendo una declaración de este tipo en la norma o especificación: *“Lo siguiente aplica a todos los límites establecidos en esta norma o especificación: Para los fines de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor calculado u observado se deberá redondear “a la unidad más cercana” en el último dígito de la derecha usado para expresar el límite de la especificación, en acuerdo con el método del redondeo de la norma INV E-823”, para determinar la conformidad con las especificaciones”.*
- 4.2** Si el método del redondeo se aplica solamente a los límites especificados para determinados requerimientos, esto se puede indicar incluyendo una declaración de este tipo en la norma o especificación: *“Lo siguiente aplica a los límites establecidos en esta norma o especificación en relación con (resistencia a la tensión),(alargamiento) y (...) en (número de la sección o numeral donde aplica) de esta norma o especificación: Para los fines de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor calculado u observado se deberá redondear al 1 kPa más cercano (resistencia a la tensión), al 0.1 % más cercano,(alargamiento) y (...),en acuerdo con el método del redondeo de la norma INV E-823”, para determinar la conformidad con las especificaciones”.*
- 4.3** Si el método del redondeo aplica a todos los límites especificados en una tabla, esto se puede indicar mediante una nota al pie de la manera que se muestra en los siguientes ejemplos:

4.3.1 Ejemplo 1 – Mismos dígitos significativos para todos los ítems:

MATERIAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA % POR MASA
Cobre	4.5 ± 0.5
Hierro	1.0 máx.
Sílice	2.5 ± 0.5
Otros constituyentes (magnesio + zinc + manganeso)	0.5 máx.
Aluminio	el resto

Nota: Con el fin de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor observado o calculado se debe redondear al 0.1 % más cercano, de acuerdo con el método de redondeo de la norma INV E-823

4.3.2 Ejemplo 2 – Los dígitos significativos no son los mismos para todos los ítems. Los requerimientos son similares:

MATERIAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA, % POR MASA	
	MÍNIMO	MÁXIMO
Níquel	57	-
Cromo	14	18
Manganeso	-	3
Sílice	-	0.40
Carbono	-	0.25
Azufre	-	0.03
Hierro	el resto	

Nota: Con el fin de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor observado o calculado se debe redondear a la unidad más cercana en el último dígito significativo usado a la derecha para expresar el valor límite, de acuerdo con el método de redondeo de la norma INV E-823

4.3.3 Ejemplo 3 – Los dígitos significativos no son los mismos para todos los ítems. Los requerimientos son diferentes:

PARÁMETRO	REQUERIMIENTOS DE TENSIÓN
Resistencia a la tensión, lbf/pg ²	60 000 a 72 000
Punto de fluencia mínimo, lbf/pg ²	33 000
Alargamiento en 2", % mínimo	22

Nota: Con el fin de determinar la conformidad con estas especificaciones, un valor observado o calculado se debe redondear a 1000 lbf/pg² para la resistencia a la tensión y el punto de fluencia y al 1 % más cercano, de acuerdo con el método de redondeo de la norma INV E-823

5 PROCEDIMIENTO DEL REDONDEO

- 5.1** Cuando el dígito siguiente a la última cifra a ser retenida sea menor de 5, no se deberá cambiar el dígito ubicado en el último sitio a ser retenido. Por ejemplo, si un resultado de ensayo es "5.14 %" y se debe reportar con aproximación a "0.1 %", como 4 es menor que 5, el resultado se reportará como "5.1 %".
- 5.2** Cuando el dígito siguiente a la última cifra a ser retenida sea mayor de 5, el dígito ubicado en el último sitio a ser retenido se deberá incrementar en una

unidad. Por ejemplo, si un resultado de ensayo es “5.16 %” y se debe reportar con aproximación a “0.1 %”, como 6 es mayor que 5, el resultado se reportará como “5.2 %”.

- 5.3** Cuando el dígito siguiente a la última cifra a ser retenida sea igual a 5 y no haya dígitos con posterioridad a él, o solamente haya ceros, el dígito ubicado en el último lugar a ser retenido se aumentará en una unidad si es impar, o se mantendrá si es par. Por ejemplo, si un resultado de ensayo es “5.150 %” y se debe reportar con aproximación a “0.1 %”, como el “1” es un número impar, el resultado se reportará como “5.2 %”, mientras que si el resultado del ensayo es “5.250 %” y se debe reportar con aproximación a “0.1 %”, como el “2” es un número par, el resultado se reportará también como “5.2 %”.
- 5.4** Cuando el dígito siguiente a la última cifra a ser retenida es “5”, y hay dígitos más allá de este 5, se deberá incrementar una unidad el dígito ubicado en el último lugar a ser retenido. Por ejemplo, si un resultado de ensayo es “5.151 %” y se debe reportar con aproximación a “0.1 %”, el resultado se reportará como “5.2 %”.
- 5.5** El procedimiento de redondeo indicado en los numerales 5.1 a 5.4 se puede plantear de esta manera general: Cuando se redondee un número en uno que tenga un número especificado de cifras significativas, se escoge aquel que sea más próximo. Si se presentan dos opciones o si los dígitos por eliminar sean un 5 o un 5 seguido de ceros, se escoge aquel que termine en un dígito par. La Tabla 823 - 1 presenta ejemplos de aplicación de este procedimiento de redondeo.
- 5.6** El valor redondeado se debe obtener en un solo paso por redondeo directo del valor disponible más preciso y no en dos o más redondeos sucesivos. Por ejemplo, “89 490 Pa” redondeado a los “1000 Pa” más cercanos es “89 000 Pa”. Es incorrecto hacer un primer redondeo a “100 Pa” para obtener “89 500 Pa” y luego redondear a “1000 Pa” para obtener “90 000 Pa”.
- 5.7** Si la especificación indica que los valores se deben redondear al más cercano 50, 5, 0.5, 0.05, etc., el valor observado o registrado se debe duplicar y redondear al más cercano 100, 10, 1, 0.1 etc., de acuerdo con los procedimientos descritos en los numerales anteriores. A continuación, el número redondeado se divide por 2 y se reporta. *Ejemplos:* (1) para redondear “6025” a los “50” más cercanos, se duplica “6025”, obteniéndose “12 050”. Este número se convierte en “12 000” al ser redondeado a los 100 más cercanos (empleando el numeral 5.3). Al dividir 12 000 por 2, se obtiene “6000”, que será el valor redondeado de “6025”; (2) Para redondear “6075” a

la unidad “50”, se duplica 6075, obteniéndose “12 150”. Este número se convierte en “12 200” al ser redondeado a los 100 más cercanos (empleando el numeral 5.3). Al dividir 12 200 por 2, se obtiene “6100”, que será el valor redondeado de “6075”.

Tabla 823 - 1. Ejemplos de redondeo A

LÍMITE ESPECIFICADO	VALOR OBSERVADO O CALCULADO	SE DEBE REDONDEAR AL MÁS CERCANO	VALOR REDONDEADO A SER USADO CON FINES DE DETERMINAR CONFORMIDAD	CONFORMIDAD CON EL LÍMITE ESPECIFICADO
Punto de fluencia, 36 000 lbf/pg ² mínimo	35 940 35 950 35 960	100 lbf/pg ² 100 lbf/pg ² 100 lbf/pg ²	35 900 36 000 36 000	No Sí Sí
Níquel, 57 %, masa, mínimo	56.4 56.5 56.6	1 % 1 % 1 %	56 56 57	No No Sí
Conductividad, 40 ms/m, máximo	40.4 40.5 40.6	1 ms/m 1 ms/m 1 ms/m	40 40 41	Sí Sí No
Bicarbonato de sodio, 0.5 % máximo, masa	0.54 0.55 0.56	0.1 % 0.1 % 0.1 %	0.5 0.6 0.6	Sí No No

^A El único propósito de estos ejemplos es ilustrar las reglas del redondeo y no reflejan necesariamente el número de dígitos asociado con los respectivos métodos de ensayo

5.8 En algunos métodos de ensayo puede existir un requerimiento de redondeo diferente a los indicados en los numerales precedentes como, por ejemplo, aproximaciones a 0.02, 0.25, 0.3, etc. en estos casos, se puede usar el siguiente procedimiento para redondear al intervalo requerido:

5.8.1 Se divide el resultado por el valor del incremento o intervalo de redondeo deseado.

5.8.2 El resultado obtenido al aplicar el numeral 5.8.1 se redondea al número entero más cercano, siguiendo el procedimiento que corresponda de los descritos en los numerales 5.1 a 5.4.

5.8.3 El resultado obtenido según 5.8.2 se multiplica por el incremento o intervalo de redondeo deseado.

5.8.4 *Ejemplos:* (1) Si se deber redondear “0.07” al “0.02 más cercano”, se divide 0.07 por 0.02, obteniéndose “3.5”. El redondeo de este valor al entero más cercano da un valor de “4” según el numeral 5.3. Se multiplica “4” por 0.02, obteniéndose “0.08”, que será el 0.07 redondeado al 0.02 más cercano. (2) Si se deber redondear “0.09” al “0.02 más cercano”, se divide 0.09 por 0.02, obteniéndose “4.5”. El redondeo de este valor al entero más cercano da un valor de “4” según el numeral 5.3. Se multiplica “4” por 0.02, obteniéndose “0.08”.

5.9 *Registro de valores observados* – A menos que se especifique de otra manera en la norma aplicable, se deberá aplicar lo siguiente cuando se registren medidas directamente en un cilindro graduado, dial o regla: Se deberán anotartodos los dígitos conocidos con exactitud del dispositivo de medición más un dígito, el cual es incierto debido a la estimación. Por ejemplo, si un cilindroestá graduado en incrementos de 0.1 ml, entonces una observación será registrada como 9.76 ml si el nivel del líquido se observa entre las marcas 9.7 y 9.8 y se estima que está a seis décimas de camino entre las dos marcas. Si el dispositivo tiene una escala tipo nonio, el último dígito a registrar deberá ser el del nonio.

5.9.1 El número de dígitos significativos suministrado por una pantalla o por la impresora de un instrumento, debe ser igual o mayor que los dados por la regla para reportar los resultados de los ensayos, según se indica en el numeral 5.11.

5.10 *Cálculos de resultados de ensayos a partir de valores observados o calculados* – Al calcular el resultado de un ensayo a partir de datos obtenidos en desarrollo del mismo, se debe evitar el redondeo de cantidades intermedias. Hasta donde sea posible con el aparato u hoja de cálculo usados, los cálculos se deben adelantar con los datos exactos del ensayo y redondear solamente al final.

5.10.1 *Ejemplo:*

5.10.1.1 Datos:

- Contenido de cemento asfáltico (P_b) = 5.142 %.
- Límite de la especificación para el cemento asfáltico = 5.3 ± 0.3 %;

- Gravedad específica bulk de la mezcla (G_{mb}) = 2.186;
- Gravedad específica bulk del agregado (G_{sb}) = 2.6359;
- Vacíos admisible en los agregados minerales (VAM admisibles) = 14.5 % mínimo.

$$5.10.1.2 \text{ VAM} = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \left(100 - P \right) = 100 - \frac{2.186}{2.6359} (100 - 5.142) = 21.33252855 \%$$

5.10.1.3 El contenido de cemento asfáltico se calculó exactamente como 5.142 %. Con el fin de comparar este valor contra el límite de la especificación, el cual es significativo al 0.1 % más cercano (por ejemplo 5.3 %), el contenido de asfalto se debe redondear al 0.1 % más cercano y se reportará como 5.1 % (Ver numerales 3.1 y 5.1).

5.10.1.4 Los VAM calculados son, exactamente, 21.33252855 %. Con el fin de comparar este valor contra el límite de la especificación, el cual es significativo a 0.1 %, el valor calculado de VAM se debe redondear al 0.1 % más cercano y reportar como 21.3 % (Ver numerales 3.1 y 5.1). Se puede ver que el valor de contenido de asfalto usado en el cálculo fue el valor exacto y no el redondeado. Esto se debe a que el cálculo del contenido de asfalto es intermedio en la determinación de los VAM. De acuerdo con el numeral 5.10, los valores intermedios no se deben redondear. Solo el valor final se redondeará y se comparará con los límites de la especificación.

5.11 *Reporte de los resultados de los ensayos* – Una regla sugerida, relaciona los dígitos significativos del resultado de un ensayo con la precisión de la medida, expresada por medio de la desviación estándar, σ . La desviación estándar aplicable es la desviación estándar de repetibilidad. El intervalo de redondeo para los resultados de los ensayos no debe ser mayor de 0.5σ ni menor de 0.05σ , pero tampoco puede ser mayor que la unidad en la especificación (Ver numeral 3.3). Si solamente se dispone de un estimativo de la desviación estándar (σ), se permite el uso de dicho estimativo. Por ejemplo, si el resultado de un ensayo es 1.45729 y la desviación estándar del método de ensayo se estima en 0.0052, el redondeo se hace a 1.457 o al más aproximado 0.001, ya que esta unidad de redondeo, 0.001, se encuentra entre $0.05\sigma = 0.00025$ y $0.5\sigma = 0.0026$.

5.11.1 Cuando no se conoce ninguna estimación de la desviación estándar, se pueden usar las siguientes reglas para la retención de dígitos

significativos de cantidades calculadas, para derivar el número de dígitos significativos a ser reportados, con base en los dígitos significativos de los datos de ensayo.

- 5.11.1.1** Al sumar o restar datos de ensayo, el resultado no debe contener cifras significativas más allá del lugar del último dígito significativo de cualesquiera de los datos.

Ejemplos:

$11.24 + 9.3 + 3.62 = 26.9$, puesto que el último dígito significativo del número “9.3” es el primero que sigue al punto decimal decimal. El valor 26.9 se obtiene redondeando el valor de la suma exacta “26.86” a un decimal (numeral 5.2).

$926 - 923.4 = 3$, porque el último dígito significativo de “926” es el último dígito o el “1 más cercano”. El valor 3 se obtiene redondeando la diferencia exacta “2.6” al “1 más cercano” (numeral 5.2).

$140\,000 + 91\,460 = 231\,000$, si se sabe que el número “140 000” era un valor redondeado al millar más cercano. El valor 231 000 se obtiene redondeando al millar el resultado de la operación, “231 460” (numeral 5.1).

- 5.11.1.2** Cuando se multiplique o se divida, el resultado no debe contener más cifras significativas que el valor con la menor cantidad de cifras significativas.

Ejemplos:

$11.38 \times 4.3 = 49$, puesto que el factor “4.3” tiene dos cifras significativas. El resultado exacto es “48.934”, el cual se redondea y reporta con dos cifras significativas (numeral 5.2).

$(926 - 923.4)/4.3 = 0.6$. En este caso solo una cifra es significativa, porque la diferencia en el numerador sólo tiene una cifra significativa (numeral 5.11.1.1, segundo ejemplo). Como resultado, el cociente exacto “0.6046511628” se redondea y reporta con un dígito significativo (numeral 5.1).

- 5.11.1.3** Cuando se usen logaritmos, los dígitos de $\ln(x)$ y de $\log_{10}(x)$ son significativos a través del lugar “n” luego del decimal, cuando “x” tiene “n” cifras significativas. Cuando se usen exponentes, el número de cifras significativas de e^x o 10^x es igual al lugar del último dígito significativo en x, después del decimal.

Ejemplos:

$\ln(3.46) = 1.241$, ya que 3.46 tiene 3 dígitos significativos. El valor exacto "1.241268589" se redondea y reporta con tres lugares después del decimal (numeral 5.1).

$103.46 = 2900$, puesto que "3.46" tiene dos dígitos significativos luego del decimal. El valor exacto "2884.031503" se redondea y reporta con dos dígitos significativos (numeral 5.2).

- 5.11.1.4** La regla para los números que representan cantidades exactas o constantes matemáticas, es que ellos se deben tratar como si tuvieran un número infinito de dígitos significativos.

Ejemplos:

$1 - x/2 = 1 - 0.23/2 = 0.88$. En este caso, "1" y "2" son constantes exactas y 0.23 es una cantidad medida con dos dígitos significativos. Habrá dos dígitos significativos en el cociente (numeral 5.11.1.2, segundo ejemplo) y en la diferencia (numeral 5.11.1.1, segundo ejemplo). Como resultado, el valor exacto "0.885" se redondea y reporta con dos dígitos significativos (numeral 5.3).

Una cantidad de 50 piezas con un espesor medido de 0.124 mm es $50 \times 0.124 = 6.20$ mm, puesto que el factor 0.124 tiene 3 cifras significativas y la cantidad 50 tiene un número infinito de cifras significativas. El producto exacto "6.2" se redondea y registra con 3 cifras significativas (numeral 5.11.1.2, primer ejemplo).

Una medida de 1.634" se convierte en mm. El resultado es $1.634 \times 25.4 = 51.50$ mm, puesto que el factor "1.634" tiene cuatro cifras significativas y la constante "25.4" se considera que tiene un número infinito de cifras significativas. El producto exacto "41.5036", se redondea y reporta con cuatro dígitos significativos (numeral 5.1 y numeral 5.11.1.2, primer ejemplo).

- 5.12** *Límites de la especificación* – Cuando se va a aplicar el método del redondeo a unos límites especificados dados, es deseable que los dígitos significativos estén de acuerdo con la precisión del ensayo siguiendo la regla del numeral 5.11. Esto es, la unidad de redondeo para los límites de la especificación debe estar entre 0.05 y 0.5 veces la desviación estándar del ensayo.

- 5.13** *Promedios y desviaciones estándar* – Cuando se reporten el promedio y la

desviación estándar de medidas replicadas o de muestras repetidas de un material, una regla que se sugiere para la mayoría de los casos consiste en redondear la desviación estándar con dos dígitos significativos y redondear el promedio al mismo último lugar de dígitos significativos. Cuando el número de

observaciones es grande (más de 15 si el dígito inicial de la desviación estándares 1, más de 50 si el primer dígito es 3, más de 100 en otros casos), puede ser conveniente un dígito adicional.

- 5.13.1** Aproximaciones alternativas para los promedios incluyen el reporte de $\bar{x}$ entre 0.05 y 0.5 veces la desviación estándar del promedio $\sigma/\sqrt{n}$, o aplicando reglas para retener dígitos significativos para el cálculo de $\bar{x}$.

Nota 1: El fundamento para la regla sugerida viene de la incertidumbre de una desviación estándar calculada, "s". La desviación estándar de "s", basada en el muestreo a partir de una distribución normal con n observaciones es, aproximadamente, $\sigma/\sqrt{2n}$. Reportar "s" dentro de 0.05 y 0.5 este valor y seguir la regla del numeral 5.11, conduce a dos dígitos significativos para la mayoría de los valores de σ cuando el número de observaciones es 100 o menos.

Ejemplo:

El análisis de seis especímenes dio los siguientes valores para uno de sus constituyentes: 3.56, 3.88, 3.95, 4.07, 4.21 y 4.47. El promedio y la desviación estándar son, respectivamente, 4.0233 y 0.3089. Según la regla sugerida, el promedio($\bar{x}$) se debe reportar como 4.02 y la desviación estándar (s) como 0.31.

6 NORMAS DE REFERENCIA

STP 303 – 1

ASTM E29-0