

RRCM e tolerâncias 3D: análise da norma técnica NBR14166/2022

Ivandro KLEIN, Rovane Marcos de FRANÇA, Adolfo Lino de ARAÚJO, Flavio BOSCATTO, Brasil

Key words: RRCM, Cadastro territorial, Posicionamento 3D, GNSS, NBR14166

SUMMARY

The article analyzes the Municipal Cadastral Reference Network (RRCM) in light of the technical standard NBR14166/2022. The RRCM is essential for land management, tax collection, urban planning, and land regularization, serving as the geometric basis to ensure legal security and administrative efficiency. The updated standard defined the maximum tolerance for three-dimensional (3D) closure errors of GNSS baseline polygons as $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$. However, the theoretical error propagation study, considering the nominal precision of post-processed static relative positioning, as well as centering and instrument height measurement errors, indicates that this criterion is overly strict, and an alternative tolerance of $\pm(30 \text{ mm} + 2.5 \text{ ppm})$ is proposed. The empirical analysis was carried out in the RRCM of Joinville/SC, one of the first to be implemented under NBR14166/2022 standards. Of the 28 polygons evaluated, 39% exceeded the defined tolerance, which required re-surveying 84% of the GNSS vectors until the criterion was fully met, significantly increasing costs and execution time. In contrast, with the proposed tolerance of $\pm(30 \text{ mm} + 2.5 \text{ ppm})$, only 7% of the polygons would exceed the limit, with deviations of no more than 3 millimeters. Thus, it is concluded that the tolerance established by NBR14166/2022 is only feasible in ideal situations with forced-centering devices, which are hardly practical in urban areas. Therefore, the adoption of the newly proposed criterion is recommended, as it better reflects practical reality while ensuring adequate accuracy and greater efficiency in implementing RRCMs.

RESUMO

O artigo analisa a Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) à luz da norma técnica NBR14166/2022. A RRCM é essencial para a gestão fundiária, arrecadação de tributos, planejamento urbano e regularização de terras, sendo a base geométrica para garantir segurança jurídica e eficiência administrativa. A norma atualizada definiu como tolerância máxima para erros de fechamento tridimensionais (3D) de polígonos formados por vetores GNSS o valor de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$. Contudo, o estudo teórico de propagação de erros, considerando a precisão nominal do posicionamento relativo estático pós processado e erros de centragem e medição da altura do instrumento, indica que tal critério é rigoroso, propondo-se o valor alternativo de $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$. A análise empírica foi conduzida na RRCM de Joinville/SC, uma das primeiras implantadas conforme a NBR14166/2022. Dos 28 polígonos avaliados, 39% ultrapassaram a tolerância definida, o que exigiu o re-rastreamento de 84% dos vetores GNSS até que este critério fosse plenamente atendido, elevando custos e tempo de execução. Em contrapartida, com a tolerância proposta de $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$, apenas 7% dos polígonos excederiam o limite e com desvios de no máximo 3 milímetros. Desta forma, conclui-se que a tolerância

estabelecida pela NBR14166/2022 é viável apenas em situações ideais de centragem forçada, pouco exequíveis em áreas urbanas. Assim, recomenda-se a adoção do novo critério proposto, mais condizente com a realidade prática, garantindo precisão adequada e maior eficiência na implantação de RRCMs.

RRCM e tolerâncias 3D: análise da norma técnica NBR14166/2022

Ivandro KLEIN, Rovane Marcos de FRANÇA, Adolfo Lino de ARAÚJO, Flavio BOSCATTO, Brazil

1. INTRODUÇÃO

A Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) é fundamental para a construção e manutenção de um cadastro territorial preciso e confiável, sendo a base geométrica sobre a qual todas as informações espaciais do município são referenciadas (Cabral et al., 2023). Sua relevância transcende a mera precisão técnica, impactando diretamente a governança fundiária ao fornecer o alicerce para a gestão de imóveis, a arrecadação de tributos, o planejamento urbano e ambiental, e a regularização de terras. Uma RRCM robusta e atualizada garante a segurança jurídica da posse e propriedade, minimiza conflitos de limites, otimiza processos de licenciamento e apoia a tomada de decisões estratégicas que visam o desenvolvimento socioeconômico sustentável da cidade. Ao assegurar a fidedignidade dos dados geoespaciais, a RRCM se torna um pilar para a transparência e a eficiência na administração pública, contribuindo para uma gestão fundiária mais justa e equitativa (Cabral et al., 2020).

No Brasil, os parâmetros técnicos da RRCM são definidos por meio da norma técnica NBR14166/2022 (ABNT, 2022), sendo uma atualização recente da primeira versão publicada em 1998. A NBR14166/1998 não contemplou as necessidades e pouco foi adotada no Brasil, sendo a versão atual exequível e tecnicamente estruturada para os tempos atuais e os aspectos legais da administração de terras 3D. Entretanto, devido à sua recente publicação, ainda são escassos os estudos que abordam de forma aprofundada os parâmetros técnicos da versão atualizada da NBR14166/2022 (Klein et al., 2022), sendo este um dos objetivos deste trabalho. Neste contexto, na referida norma, para a implantação de vértices superiores da RRCM, que são os primeiros vértices a serem planejados e mensurados na rede, o erro de fechamento 3D dos vetores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) não deve exceder $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$. Este artigo busca revisitar esse critério, tanto por uma tolerância teórica para erros de fechamento 3D definida por propagação de erros quanto por um estudo de caso de uma das RRCM pioneiras no Brasil nos moldes da NBR14166/2022, onde dezenas de vetores GNSS e erros de fechamento 3D de polígonos são apresentados e analisados.

2. TOLERÂNCIA PARA ERROS DE FECHAMENTO 3D DE VETORES GNSS POR PROPAGAÇÃO DE ERROS

Segundo ABNT (2022), o erro de fechamento tridimensional de cada polígono de três lados da rede GNSS deve ser igual ou melhor que $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$, considerando a extensão tridimensional do polígono considerado. A precisão nominal atual do posicionamento relativo estático pós-processado informada por boa parte dos receptores GNSS disponíveis no mercado é da ordem de $2,5 \text{ mm} + 0,1 \text{ ppm}$ na componente horizontal e de $3,5 \text{ mm} + 0,4 \text{ ppm}$ na componente vertical. Outra importante fonte de erro diz respeito ao erro de centragem, cujo valor fornecido por alguns fabricantes é da ordem de 1 mm por metro de altura do receptor instalado em tripé com base nivelante (Klein & Lima, 2018; França et al., 2024a). Além disso,

tem-se ainda o erro de medição da altura do instrumento com trena, cujo valor esperado é da ordem de 1,5 mm.

Os lados (vetores GNSS) de um polígono de três lados devem ser obtidos por duas ou três sessões de rastreamento diferentes, para garantir independência dos vetores GNSS (Monico, 2008; ABNT, 2022). Considerando as precisões nominais do posicionamento relativo estático pós-processado e erros de centragem (ε_c) e de altura do instrumento (ε_a) como $\varepsilon_c = \varepsilon_a = 1,5$ mm, o fechamento de um triângulo cujos vetores GNSS foram obtidos em três sessões de rastreamento distintas tem as seguintes incertezas esperadas (desvios-padrões):

$$\sigma_H = \sqrt{3 \cdot [(1,5 \text{ mm})^2 + (2,5 \text{ mm})^2 + (0,1 \text{ ppm})^2]} = 5,7 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm} \quad (1)$$

$$\sigma_V = \sqrt{3 \cdot [(1,5 \text{ mm})^2 + (3,5 \text{ mm})^2 + (0,4 \text{ ppm})^2]} = 7,1 \text{ mm} + 0,7 \text{ ppm} \quad (2)$$

onde σ_H é o desvio-padrão na componente horizontal e σ_V é o desvio-padrão na componente vertical. Considerando a incerteza esperada da resultante tridimensional (3D), tem-se:

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_V^2} = 9,1 \text{ mm} + 0,7 \text{ ppm} \quad (3)$$

Assumindo que todos os erros envolvidos seguem a distribuição normal e a tolerância usual de três desvios-padrão (“regra dos três sigmas”), relativa a um nível de confiança de $NC=0,99863$ ($\approx 99,9\%$), o valor de tolerância para os erros de fechamento 3D de vetores GNSS resulta em:

$$T_{3D} = 3 \cdot (9,1 \text{ mm} + 0,7 \text{ ppm}) = 27,2 \text{ mm} + 2,1 \text{ ppm} \quad (4)$$

Destaca-se que há diversas outras fontes de erros envolvidas em aplicações práticas (Monico, 2008). Desta forma, considerando uma margem de segurança, propõe-se aqui o seguinte valor de tolerância para os erros de fechamento 3D de vetores GNSS:

$$T_{3D} = \pm (30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm}) \quad (5)$$

3. EXPERIMENTOS E DISCUSSÕES

Além da análise teórica de propagação de erros, apresenta-se ainda uma análise com dados reais referente a RRCM de Joinville/SC (Figura 1), uma das primeiras RRCM de acordo com a nova versão da NBR14166/2022 (França et al., 2024b). A análise aqui descrita é referente as primeiras campanhas de rastreamento GNSS da referida RRCM.

Analisando a Tabela 1 e a Figura 1a, nota-se que 11 dos 28 polígonos ($\approx 39,3\%$ do total) possuem erros de fechamento 3D excedendo a tolerância de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ da NBR14166/2022. Destaca-se o caso dos polígonos “4”, “10” e “12”, que excedem a referida tolerância mas estão envolvidos por polígonos que atendem a tolerância utilizando os mesmos vetores GNSS. Ressalta-se que os referidos vetores GNSS foram aprovados em todos os demais critérios técnicos da NBR14166/2022, inclusive na análise dos resíduos após o ajustamento, reduzindo a probabilidade da hipótese de erros grosseiros (ver ABNT, 2022; Klein et al., 2022).

Analisando a Tabela 1 e a Figura 1b, nota-se que apenas 2 dos 28 polígonos ($\approx 7,1\%$ do total) possuem erros de fechamento excedendo a tolerância proposta de $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$. Além disso, os valores excedentes são de no máximo 3 mm, enquanto na tolerância de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ os valores excedentes atingem até 50 mm.

Tabela 1. Resultados numéricos dos experimentos realizados na RRCM em estudo

Polígono	Extensão 3D (km)	Erro 3D (mm)	Tolerância (mm)	Tolerância proposta (mm)
1	12,8	27	31	83
2	11,9	40	30	80
3	9,9	8	27	73
4	10,2	47	28	74
5	7,6	14	23	63
6	10,7	24	28	76
7	10,6	26	28	76
8	10,5	27	28	74
9	11,8	28	30	81
10	11,9	46	31	82
11	10,0	15	27	73
12	8,7	32	25	67
13	7,2	11	22	61
14	7,2	15	22	61
15	9,1	5	25	69
16	8,1	10	24	64
17	9,0	23	25	68
18	6,5	20	21	58
19	6,8	18	22	59
20	9,1	46	25	68
21	7,6	49	23	63
22	8,1	47	24	65
23	10,1	77	27	74
24	8,9	47	25	68
25	7,0	62	22	60
26	7,2	30	22	61
27	7,9	19	27	72
28	8,7	33	25	67

Destaca-se que dos 50 vetores originais (Figura 1), 42 (84% do total) tiveram que ser rastreados novamente para atender ao critério de tolerância de fechamento 3D de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$. Destes, 6 vetores (12% do total) tiveram que ser rastreados 3 vezes para que todos os polígonos da Figura 1 atendessem a tolerância de fechamento 3D da NBR14166/2022. Com o novo valor proposto de $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$, certamente este número seria muito menor, o qual estimamos em apenas 9 vetores a serem repetidos (considerando a mesma proporção de triângulos rejeitados). Ressalta-se que como os valores excedidos na tolerância proposta foram de poucos milímetros, haveria a possibilidade de tratar os dados no intuito de atender a tolerância proposta sem comprometer a qualidade dos resultados (ver Klein et al., 2022).

Desta forma, o custo de execução da referida RRCM foi muito além do inicialmente previsto, destacando que todos os vetores GNSS da primeira campanha de rastreios atendiam a todos os demais critérios técnicos da NBR14166/2022, inclusive na análise dos resíduos do ajustamento. Estes resultados, além da análise teórica realizada, fornecem indícios que a tolerância do erro de fechamento 3D de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ da NBR14166/2022 é muito rigorosa quando se

implanta vértices sobre o solo. O valor estabelecido na NBR 14.166/2022 seria plausível apenas para vértices implantados com dispositivos de centragem forçada (eliminando os erros de centragem e de altura), o que na prática seria inviável realizar na íntegra de uma RRCM em área urbana de uma cidade (França, 2023). Portanto, a nossa recomendação é a adoção do novo valor proposto de $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$ para a tolerância dos erros de fechamento 3D.

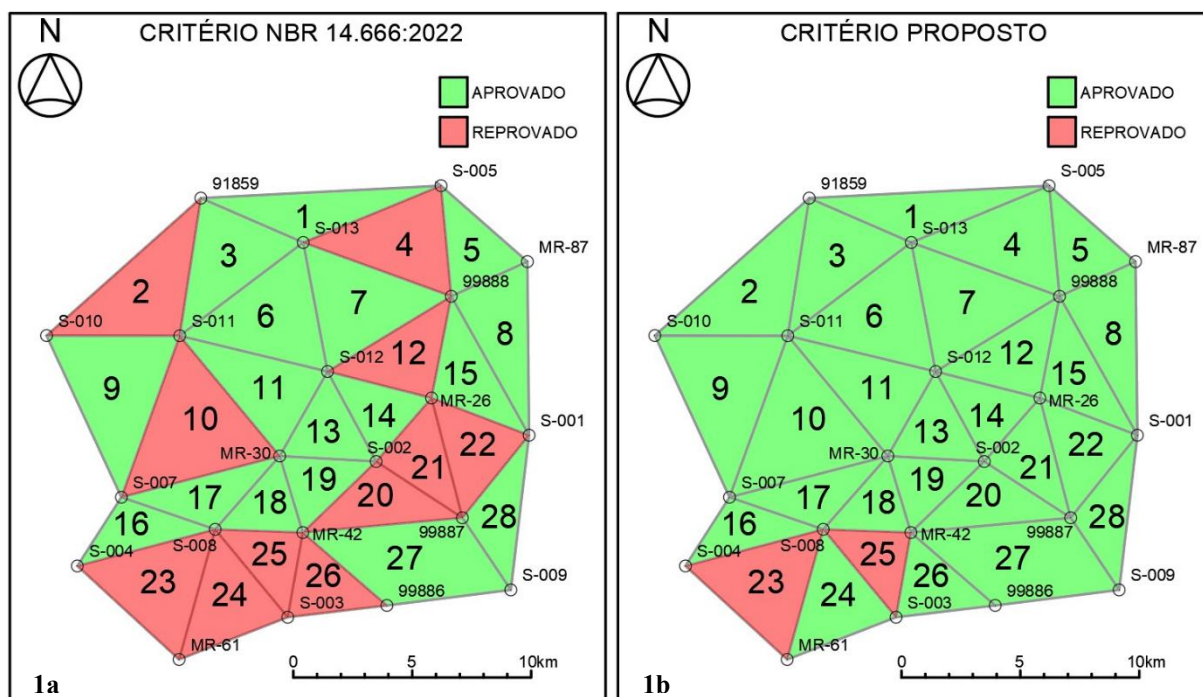


Figura 1. Polígonos 3D, vértices e vetores GNSS da RRCM analisada

4. CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo revisitar o critério do erro de fechamento 3D de polígonos formados por vetores GNSS contido na NBR14166/2022: $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$. Para isto, um estudo teórico de propagação de erros foi realizado considerando a precisão nominal do posicionamento relativo estático pós processado contida nos manuais de boa parte dos receptores GNSS atualmente disponíveis no mercado, além do erro de centragem e de altura do instrumento. Considerando ainda uma margem de segurança para outras fontes de erro de difícil predição, propõe aqui um novo valor de tolerância de $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$.

Além do estudo teórico, uma análise dos erros de fechamento 3D da RRCM de Joinville/SC, uma das pioneiras nos moldes da NBR14166/2022, foi apresentada e discutida. Os resultados obtidos mostraram que 11 dos 28 polígonos apresentaram erros de fechamento 3D acima da tolerância, o que exigiu o novo rastreamento de 42 dos 50 vetores GNSS até que todos os polígonos atendessem a tolerância estipulada de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$. Além disso, estes 50 vetores GNSS da primeira campanha foram aprovados em todos os demais critérios técnicos da NBR14166/2022, inclusive na análise dos resíduos do ajustamento, o que diminui a probabilidade da hipótese de existência de erros grosseiros.

Com o novo critério proposto de $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$, apenas 2 dos 28 polígonos apresentaram erros de fechamento 3D acima da tolerância, o que certamente resultaria em um menor número de novos rastreios GNSS e logo menor custo de execução da referida RRCM. Estes resultados, além da análise teórica realizada, fornecem indícios que a tolerância do erro de fechamento 3D de $\pm(10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ da NBR14166/2022 é muito rigorosa.

Essa conclusão revela-se particularmente pertinente, uma vez que as normas técnicas devem estabelecer parâmetros exequíveis aos profissionais, respaldados por fundamentos sólidos sob as perspectivas teórica e técnica, a fim de garantir sua efetiva aplicabilidade e fomentar as boas práticas no âmbito do cadastro 3D (Klein & Lima, 2018; Klein et al., 2022). Portanto, recomenda-se a adoção do novo valor aqui proposto para os erros de fechamento 3D de polígonos formados por vetores GNSS: $\pm(30 \text{ mm} + 2,5 \text{ ppm})$.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 14166: Rede de Referência Cadastral Municipal - Procedimento. Rio de Janeiro.
- Cabral, C. R. et al. (2020). Uma proposta de Cadastro Territorial para o Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72.
- Cabral, C. R. et al. (2023). O método do alinhamento para a densificação de rede de referência cadastral municipal – RRCM. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 11, n. 1.
- França, R. M. 2023. Redes geodésicas horizontais em áreas urbanas: uma nova proposta para a densificação. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 117p.
- França, R. M.; Klein, I.; & Veiga, L. A. K. (2024a). Densificação de RRCM a baixo custo e sem erros de centragem. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 76.
- França, R. M.; Pedro, P. C.; & Becker, J. H. (2024b). Nova Rede de Referência Cadastral Municipal de Joinville conforme NBR 14.166:2022. In: *Anais do XVI COBRAC*, Florianópolis 11-13 Nov.
- Klein, I. & Lima, A. P. B. (2018). Estudos iniciais sobre a incerteza posicional dos vértices de imóveis urbanos a luz do SINTER. In: *Anais do XIII COBRAC*, Florianópolis 21-24 Out.
- Klein, I.; Cabral, C. R.; Hasenack, M. (2022). A nova versão da NBR14166/2022: Principais aspectos e recomendações. In: *Anais do XV COBRAC*, Florianópolis 7-9 Nov.
- Monico, J. F. G. (2008). Posicionamento pelo GNSS, descrição, fundamentos e aplicações. 2º ed. São Paulo, SP: Editora UNESP.

NOTAS BIBLIOGRÁFICAS

Ivandro Klein é natural de Porto Alegre/RS (1987). Engenheiro Cartógrafo (2009), Mestre (2012) e Doutor (2014) em Sensoriamento Remoto pela UFRGS. Atualmente é professor do Curso Técnico de Agrimensura do IFSC e membro permanente externo do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Desenvolve pesquisas nas áreas de planejamento, ajustamento e controle de qualidade de redes geodésicas. Possui diversas videoaulas gratuitas em www.youtube.com/ivandroklein1 e

www.youtube.com/Agri mensura IFSC (playlist de Geodésia e Ajustamento: <https://surl.li/bulpjs>).

Rovane Marcos de França nasceu em Tubarão (SC) em 1973. Técnico em Estradas pela ETFSC, Técnico em Geomensura pelo CEFETSC, Engenheiro Civil pela UNISUL, Mestre em Engenharia pela UFSC e Doutor em Ciências Geodésicas pela UFPR. Possui experiência e desenvolve pesquisa em Cadastro Territorial, Topografia, Escaneamento a Laser 3D, Fotogrametria e BIM para Infraestrutura. Atua como professor do IFSC no Curso Técnico de Agrimensura e no Curso Técnico em Geoprocessamento do IFSC no Campus Florianópolis (SC).

Adolfo Lino de Araújo. Técnico em Agrimensura (IFSC), Engenheiro Civil (UFPB), Mestre em Engenharia Cartográfica (UFPE), Doutor em Engenharia Civil (UFSC). Membro da Comissão Nacional de Cartografia, Grupo de Trabalho sobre Cadastro. Atuou como membro da Comissão de Revisão da Portaria 511 do Ministério das Cidades sobre Cadastro Territorial Multifinalitário. Professor do Curso Técnico em Agrimensura do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Membro da Comissão de Estudos de Topografia da ABNT.

Flavio Boscatto, São Paulo. Técnico em Geomensura (CEFET/SC, atual IFSC). Doutor e Mestre em Engenharia Civil na área de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial (UFSC). Engenheiro de Aquicultura (UFSC). Especialista e Licenciado em Docência para Educação Profissional (IFSC). Professor no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) no Curso Técnico de Agrimensura. Membro da Comissão de Estudos de Topografia da ABNT.

CONTACTS

Ivandro Klein

Email: ivandro.klein@ifsc.edu.br

Rovane Marcos de França

Email: rovane@ifsc.edu.br

Adolfo Lino de Araújo

Email: adolfo.lino@ifsc.edu.br

Flavio Boscatto

Email: flavio.boscatto@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)
Avenida Mauro Ramos, 950, Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACC)
Florianópolis
BRASIL