

Entendendo a atenuação e sua relação com a resistência elétrica do condutor do cabo

Paulo S. Marin

Doutor em EMI/EMC aplicada à infraestrutura de TI

(Artigo publicado na revista RTI, Ano XXIII, Nº 268, setembro/2022)

Introdução

A atenuação é um dos parâmetros secundários de um canal de transmissão. Em meu artigo “entendendo a diafonia (*crosstalk*)”, publicado na edição número 263 da RTI (04/2022), eu discuto os parâmetros primários e secundários de canais de transmissão, caso o leitor tenha interesse em fazer uma breve revisão de conceitos.

As características elétricas de transmissão de um canal constituído por um cabo balanceado são bem representadas pela expressão a seguir.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad [1]$$

Onde,

γ é o coeficiente de propagação do canal

α é o coeficiente de atenuação do canal

β é o deslocamento de fase

Não é meu propósito aqui aprofundar a matemática envolvida na determinação das características de propagação, mas gostaria de chamar a atenção do leitor ao parâmetro α , que é aquele que determina as características de atenuação do canal, que apresenta comportamentos distintos para frequências baixas e altas dentro da escala de frequências de operação. Conforme mostrado na expressão [1], o coeficiente de atenuação (α) é função dos parâmetros de linha do canal (R, L, G e C). Embora todos os parâmetros primários estejam envolvidos na resposta de atenuação do canal, a dependência da resistência é muito importante e mais forte na faixa de frequências mais baixas na escala de frequência operacional.

Colocando de forma bastante simples e objetiva, a atenuação pode ser definida como a perda de potência de um sinal devido à sua propagação por um determinado meio físico. Entretanto, o grau de atenuação do meio varia em função do material, ou combinação de materiais, que o constitui, perdas no dielétrico, frequência de operação, temperatura, entre outros fatores.

A atenuação é expressa em dB (decibel) por unidade de comprimento para um dado segmento de cabo. Um dB é definido como dez vezes o logaritmo na base dez da relação entre a potência do sinal presente na saída de um circuito (ou canal) e a potência do sinal da entrada, conforme a expressão abaixo.

$$A = -10 \log \left(\frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada}} \right) \text{ dB} \quad [2]$$

Embora o resultado da expressão acima seja um número positivo, o sinal negativo ajuda a indicar que a atenuação se trata de uma perda. É importante explicar que o valor da atenuação, entretanto, é expresso por seu módulo ou valor absoluto.

Para um circuito genérico, a atenuação pode ser também entendida como a relação entre a potência do sinal de saída e sua potência original (sinal de entrada), conforme mostrado na Figura 1.

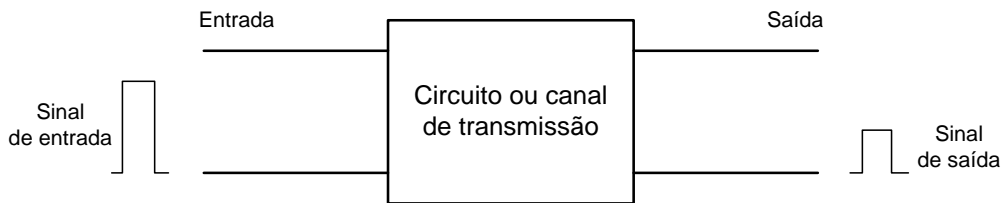


Figura 1 - Conceito de atenuação para um circuito genérico

Na Figura 1, a atenuação é calculada com base na expressão [2]. Vale lembrar que o logaritmo na base dez de um número é a potência à qual o número 10 deve ser elevado (por exponenciação) para dar como resultado aquele número. Portanto, o logaritmo de 10 na base 10 é igual a 1, pois 10 elevado à primeira potência é igual a 10. Da mesma forma, 10 elevado à 0,301 é igual a 2 e assim por diante.

Sendo a atenuação uma função logarítmica entre potências, quando este parâmetro apresentar um valor de 3dB, isso significa que a relação entre as potências de entrada e saída é de dois para um (uma redução pela metade). Em outras palavras, cada vez que a relação entre potências dobrar ou for reduzida à metade, teremos um valor absoluto de ganho ou perda de 3dB. No caso da atenuação, estamos nos referindo sempre à perda. Observe algumas relações interessantes de potência e atenuação equivalente (em dB) na Tabela 1.

Tabela 1 - Relações entre potências, em dB.

Relação entre potências	Logaritmo na base 10 (valor absoluto)	Atenuação, valor absoluto (dB)
2:1 (50%)	0,301	3
5:1 (20%)	0,70	7
10:1 (10%)	1,000	10
20:1 (5%)	1,301	13
100:1 (1%)	2,000	20
200:1 (2%)	2,301	23
1000:1 (0,1%)	3,000	30

Apenas como exemplo, em cabeamento estruturado, basicamente para as classes de aplicação D (100 MHz) e E (250 MHz), a atenuação de um canal com 100 metros de comprimento está entre 20 e 40 dB, aproximadamente, ou seja, 20 a 40 dB/100 m. Isso significa que as relações entre potências são das ordens de 100:1 e 1000:1. Em termos práticos, uma atenuação de 20 dB significa que apenas um centésimo da potência transmitida foi entregue efetivamente ao receptor.

A Figura 2 exemplifica o comportamento da resposta de atenuação de um canal de classe E (250 MHz).

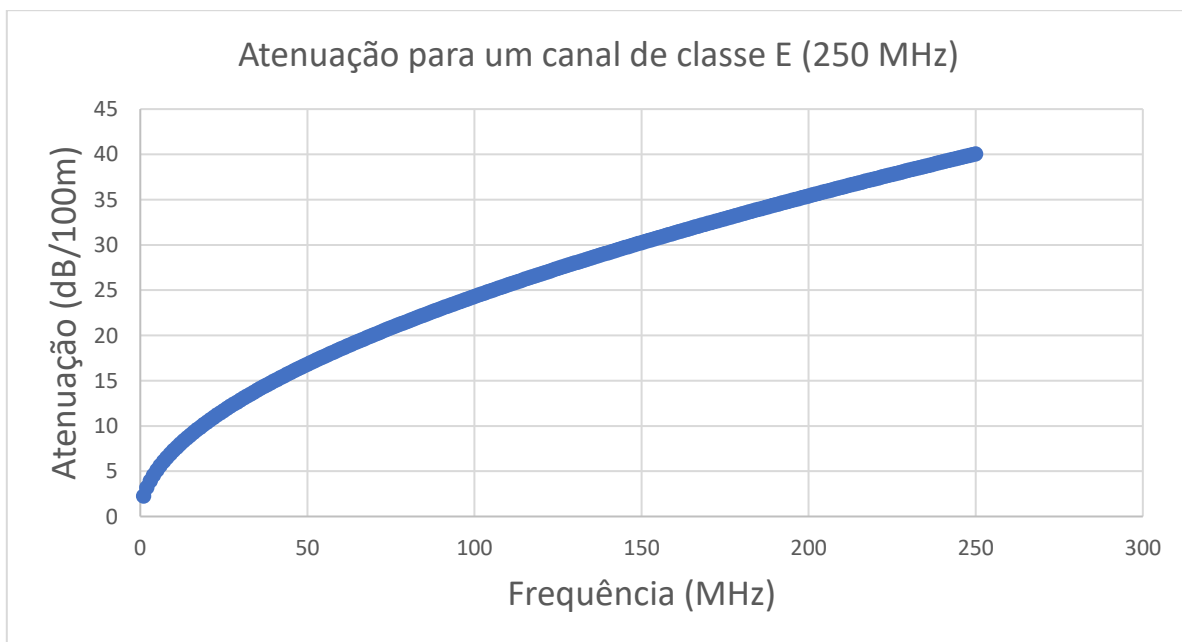


Figura 2 – Exemplo de resposta de atenuação para um canal de classe E (250 MHz)

Independentemente da classe de aplicação considerada, o comportamento da atenuação segue uma função logarítmica, conforme a curva mostrada na Figura 2.

Para efeito de comparação, cabos de fibras ópticas apresentam atenuações da ordem de 0,4 a 3,5 dB/km.

Aproveito para esclarecer que isso não significa que cabos ópticos sejam melhores que cabos de cobre, são apenas meios de transmissão com características diferentes. Como a atenuação de cabos ópticos é muito mais baixa, é por esse motivo que esses cabos são utilizados em comunicações a longas distâncias.

Atenuação como relação entre tensões

Para conhecimento, a atenuação pode ser expressa também em termos das relações entre tensões em vez de potências. Nesse caso, a expressão abaixo se aplica.

$$A = -20 \log \left(\frac{\text{Tensão de saída}}{\text{Tensão de entrada}} \right) \text{ dB}$$

Quando a atenuação é determinada por meio das relações entre tensões, uma relação de 2:1 (50% de redução) resulta em uma atenuação de 6 dB, valor absoluto. De qualquer maneira, neste artigo me refiro à atenuação sempre como uma relação entre potências.

Fatores determinantes da atenuação relacionados à resistência elétrica do condutor

Conforme mencionado anteriormente, a atenuação é um parâmetro secundário de uma linha ou canal de transmissão com forte dependência da resistência elétrica (R) da linha.

Como todo parâmetro secundário, ela depende, fundamentalmente, de aspectos inerentes ao circuito (ou canal). No entanto, de forma diferente de outros parâmetros secundários, a atenuação sofre também uma forte influência de alguns fatores externos.

Portanto, os fatores que afetam a atenuação de cabos metálicos são:

- Variação da escala de frequências de operação
- Variação de temperatura do ambiente de operação
- Dimensão da seção transversal do condutor (bitola do condutor)
- Aspectos construtivos dos cabos relacionados aos seus parâmetros de linha

A variação da resistência do condutor em função da frequência (referida como resistência em corrente alternada) é o maior fator que contribui para a variação de sua atenuação. A condutância de cabos com dielétricos plásticos (PVC, por exemplo, e outros compostos) é tão baixa que pouco afeta a atenuação dos condutores isolados para uma ampla faixa de frequências.

Embora a resistência seja mais afetada pela temperatura em frequências mais baixas do que em frequências mais altas, o efeito da temperatura na atenuação é igualmente percebido ao longo da escala de frequências de operação de um determinado cabo. A expressão a seguir mostra a variação da resistividade do cobre em função da temperatura.

$$\rho(T_1) = \rho_0(1 + \alpha(T_1 - T_0)) \quad [3]$$

Onde,

α é o coeficiente de temperatura (%/°C)

T_0 é a temperatura de referência, normalmente a temperatura ambiente (20 °C)

T_1 é a temperatura de interesse para a qual se deseja determinar a resistividade equivalente (°C)

A Figura 3 mostra o comportamento da resistência em corrente contínua em função da temperatura para um cabo de cobre balanceado de quatro pares com bitola de 24 AWG.

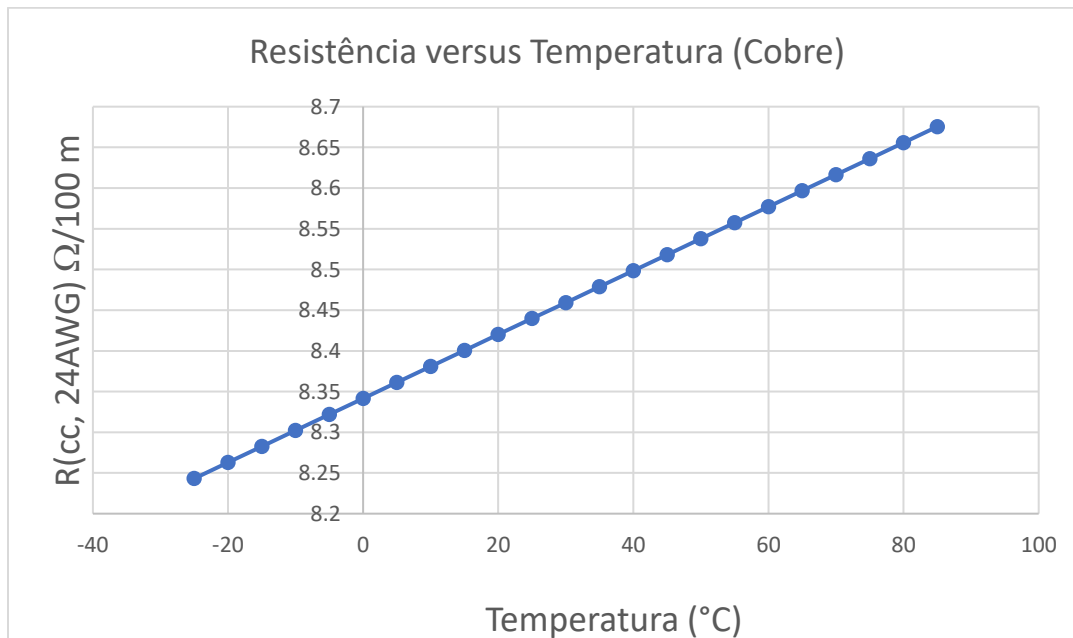


Figura 3 – Resistência em corrente contínua em função da temperatura para cabos balanceados com condutores de cobre

A bitola do condutor também é fator determinante em sua resposta de atenuação. Os condutores de menor seção transversal (bitola) apresentam maiores valores de atenuação que condutores com maior seção transversal. Por exemplo, cabos com condutores de 26 AWG apresentam atenuação superior àquela de cabos com condutores de 22 AWG. Vale lembrar que quanto maior o número em AWG, menor é a bitola (seção transversal) do condutor. A resistência em corrente contínua de condutores de cobre pode ser determinada por meio da seguinte expressão.

$$R_0 = \frac{4\rho}{\pi d^2} \Omega/\text{km} \quad [4]$$

Onde,

ρ é a resistividade do cobre ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$)

d é o diâmetro do condutor (mm)

Pode parecer estranho à primeira vista entender que, embora contendo mais material condutor (cobre, nesse caso), condutores com diâmetros maiores apresentam resistências mais baixas e, conseqüentemente, atenuações inferiores àqueles com diâmetros superiores. Uma explicação simples para isso é que a resistividade do cobre (para uma dada temperatura) é um valor constante. Portanto, com o aumento da seção transversal do condutor, sua resistência equivalente diminui (ver [4]).

Aplicando a expressão [4], podemos determinar a resistência em corrente contínua de condutores de cobre com diâmetros diferentes. Para exemplificar esse comportamento, vamos determinar as resistências de condutores de 22 AWG e de 24 AWG.

A resistividade do cobre à temperatura ambiente (20 °C) é 17,241 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$.

$$R_{0(22)} = \frac{4\rho}{\pi(0,6438)^2} = 52,963 \Omega/\text{km}, R_{0(22)} = 5,30 \Omega/100 \text{ m} \quad [5]$$

$$R_{0(24)} = \frac{4\rho}{\pi(0,5106)^2} = 84,199 \text{ W}/\text{km}, R_{0(24)} = 8,42 \Omega/100 \text{ m} \quad [6]$$

Como informação, um dado de catálogo para a resistência em corrente contínua de um determinado cabo balanceado de quatro pares é 8,65 $\Omega/100 \text{ m}$.

É importante enfatizar que, embora as bitolas de cabos elétricos no Brasil sejam especificadas em mm^2 , os cabos de telecomunicações continuam tendo suas bitolas especificadas em AWG.

A Tabela 2 traz alguns valores de resistência em corrente contínua para condutores de cobre com bitolas diferentes.

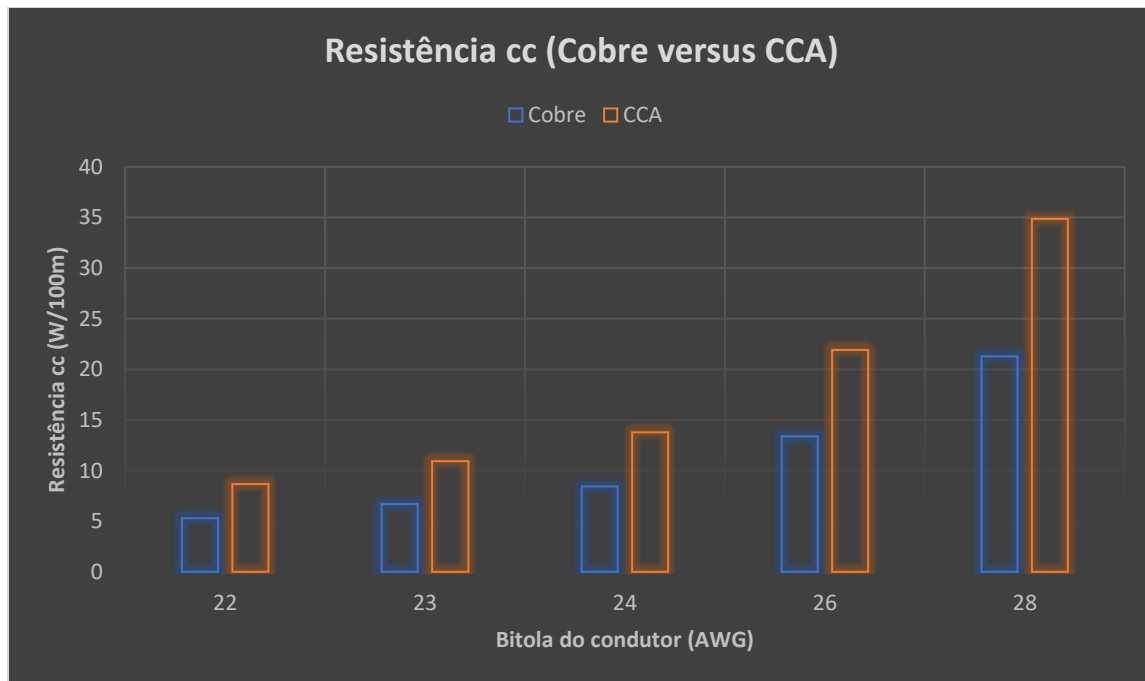
Tabela 2 – Resistência em corrente contínua para condutores de cobre em função da bitola

Bitola do condutor (AWG)	Diâmetro (mm)	Resistência ($\Omega/100$ m)
22	0,6438	5,2963
23	0,5733	6,6790
24	0,5106	8,4199
26	0,4049	13,389
28	0,3211	21,291

Cabos CCA (copper-clad aluminum)

Cabos CCA, ou cabos de alumínio cobreado, são construídos com condutores de alumínio cobertos por uma camada pelicular de cobre e, em seguida, envolvidos em material dielétrico. Embora esses cabos sejam comuns no mercado de fios e cabos, eles não são reconhecidos para uso em sistemas de cabeamento estruturado em conformidade com a normalização vigente do setor (nacional e internacional).

A resistência em corrente contínua desse tipo de cabo é muito superior àquela dos cabos com condutores de cobre puro e, portanto, apresentam maior atenuação. A Figura abaixo mostra, para efeito de comparação, os valores da resistência em corrente contínua para diferentes bitolas de cabos com condutores de cobre e alumínio cobreado.



A resistência em corrente contínua dos condutores de cabos CCA é cerca de 60% superior àquela para cabos com condutores de cobre puro.

Sabemos que a atenuação varia em função dos parâmetros primários da linha (R, L, G e C). Embora a indutância (L) seja reduzida em função da frequência (ao contrário da resistência), a impedância característica do cabo é mantida dentro de suas especificações, ou seja, $100 \Omega \pm 15\%$.

Enfim, a atenuação é muito dependente da resistência do condutor, que aumenta com o aumento da frequência por causa do efeito pelicular, do efeito de proximidade e de correntes parasitas nos pares adjacentes e na capa do cabo. Essa resistência equivalente, referida como resistência em corrente alternada, é determinada conforme mostrado na expressão abaixo.

$$R_{ac} = R_0 + R_{skin} + R_{prox} + R_{parasita} \quad (\Omega) \quad [7]$$

Onde,

R_{ac} é a resistência em corrente alternada resultante

R_0 é a resistência em corrente contínua

R_{skin} é o incremento no valor da resistência devido ao efeito pelicular

www.paulomarin.com

R_{prox} é o incremento no valor da resistência devido ao efeito de proximidade

$R_{parasita}$ é o incremento no valor da resistência devido ao efeito de correntes parasitas

Em cabos balanceados, a contribuição no aumento da resistência devido a correntes parasitas pode ser considerada nula.

É importante explicar que a blindagem do cabo, para cabos balanceados blindados, também representa um incremento no valor da resistência em corrente alternada equivalente do cabo. Veremos isso mais tarde neste artigo.

Efeito pelicular

De forma bastante simplificada, o efeito pelicular consiste na concentração de cargas na superfície do condutor e ausência de carga em seu núcleo à medida que a frequência aumenta. É isso que leva ao aumento da atenuação do condutor com o aumento da frequência. O efeito pelicular é mostrado na Figura 4.

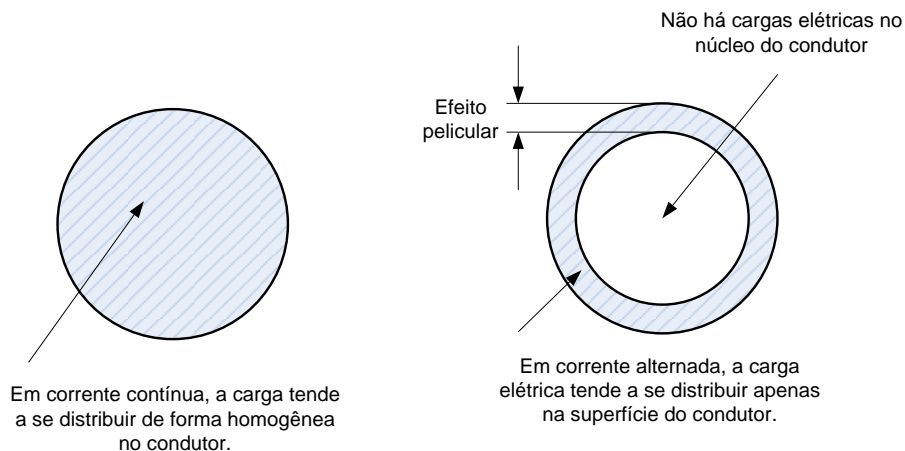


Figura 4 – Representação do efeito pelicular

As representações da Figura 4 são apenas didáticas com o objetivo de explicar o efeito pelicular. Esse efeito, para condutores cilíndricos retilíneos, depende do parâmetro x , que pode ser calculado conforme a expressão a seguir.

$$x = 2\pi r \sqrt{\frac{2\mu f}{\rho}} \quad [8]$$

Onde,

μ é permeabilidade magnética do dielétrico

f é a frequência de operação

ρ é a resistividade do material do condutor
 r é o raio do condutor

O incremento de resistência devido ao efeito pelicular, será então determinado como mostrado na expressão abaixo.

$$R_{skin} = \frac{R_{cc} \cdot x}{2\sqrt{2}} \quad [9]$$

Efeito de proximidade

A resistência de laço em corrente contínua para um par balanceado é o dobro da resistência em corrente contínua para um condutor individual do par. No entanto, isso não é verdade para a resistência em corrente alternada devido ao efeito de proximidade, que ocorre devido a repulsão entre correntes que se propagam em cada condutor e leva à redução da densidade de corrente, conforme mostrado na Figura 5.

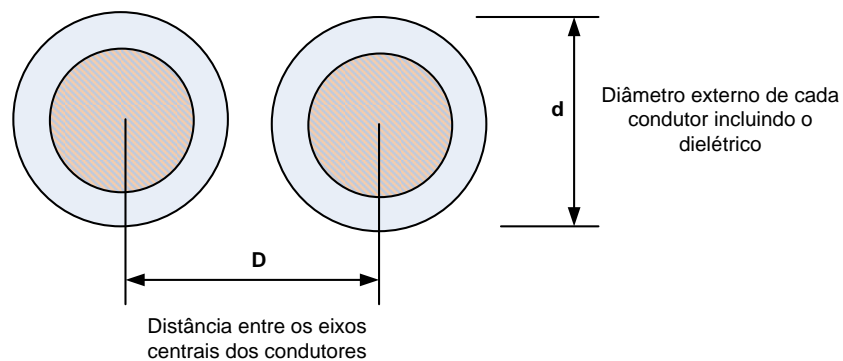


Figura 5 – Representação do efeito de proximidade

O efeito de proximidade é proporcional a relação entre o diâmetro dos condutores isolados e a distância entre os centros dos condutores (d/D). A determinação da resistência devido ao efeito de proximidade é bastante complexa e envolve funções cilíndricas (casos particulares das funções de Bessel). Não vou entrar nesses detalhes neste artigo e isso não causa qualquer prejuízo em sua compreensão.

Portanto, quando consideradas as contribuições dos efeitos pelicular e de proximidade, observamos o quanto a resistência do condutor aumenta. Essas contribuições sobre a resistência em corrente contínua são mostradas na curva da Figura 6 para um cabo balanceado de cobre com condutor de bitola 24 AWG, à temperatura ambiente (20 °C).

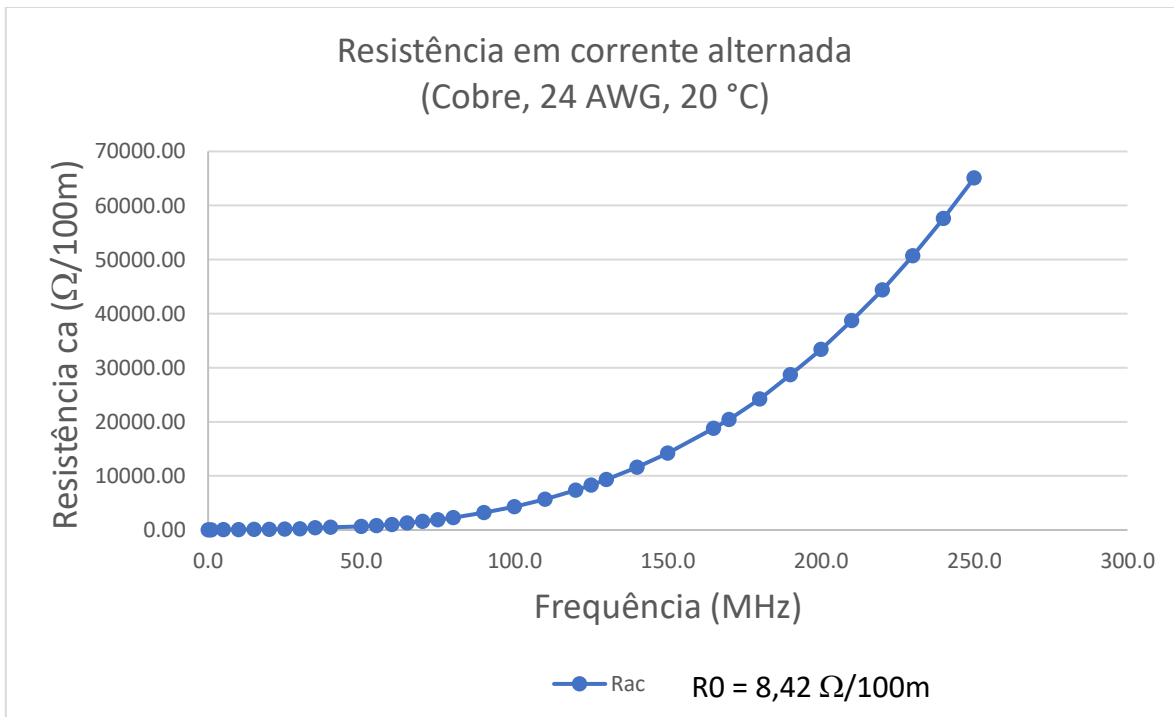


Figura 6 – Resistência em corrente alternada para cabos de cobre em função dos efeitos pelicular e de proximidade

Aproveito para chamar a atenção do leitor para a grande variação que a resistência do condutor sofre entre seu valor em nível de corrente contínua ($R_0 = 8,42 \Omega/100m$) e seu valor em corrente alternada devido às contribuições desses efeitos ($R_{ac} = 65 \text{ k}\Omega/100m$, em 250 MHz).

Efeito da blindagem

Como vimos até aqui, a resistência do condutor de um cabo metálico varia em função de diversos fatores construtivos e operacionais que, por sua vez, afetam a resposta de atenuação do cabo.

Como se isso não fosse o suficiente para aumentar a resistência em corrente alternada de cabos balanceados e, conseqüentemente, sua atenuação, um fator adicional que influencia esse parâmetro é a presença de blindagem. Um cabo balanceado blindado é um cabo de pares trançados envolvido por uma estrutura tubular metálica, conforme mostrado na Figura 7.

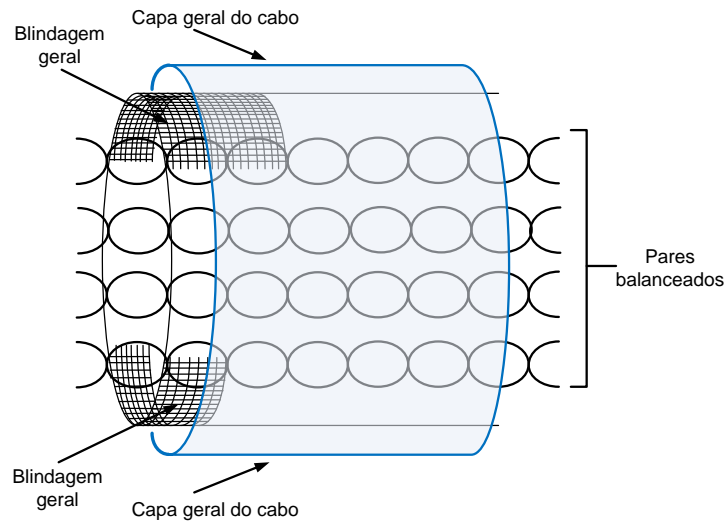


Figura 7 – Representação de um cabo balanceado blindado

A blindagem representada na Figura 7 é do tipo malha, porém outros tipos de blindagens podem ser utilizados de acordo com normas técnicas. Portanto, diversos tipos de cabos blindados balanceados são reconhecidos para uso em cabeamento estruturado. Os mais comumente utilizados no mercado são:

- *F/UTP (foil/unshielded twisted-pair)*: cabo com pares balanceados sem blindagens individuais envolvidos por uma blindagem geral do tipo folha metálica.
- *S/FTP (shielded/foil twisted-pair)*: cabo com pares balanceados blindados individualmente com blindagem do tipo folha metálica envolvidos por uma blindagem geral do tipo malha.

A Figura 8 mostra alguns tipos de cabos balanceados blindados reconhecidos pela ABNT NBR 14565.



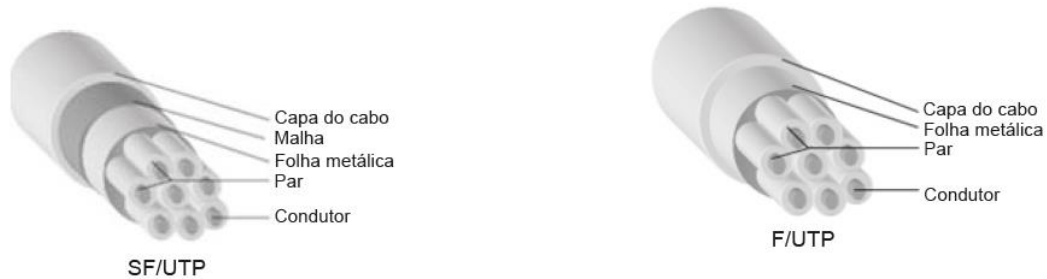


Figura 8 – Tipos de cabos balanceados de quatro pares reconhecidos para cabeamento estruturado e suas denominações conforme a ABNT NBR 14565:2019

Como lembrete, a notação vigente para cabos balanceados sem blindagem, inclusive adotada pelas normas brasileiras de cabeamento, é U/UTP (*unshielded/unshielded twisted-pair*).

Portanto, quando cabos balanceados são envolvidos por uma blindagem metálica, as correntes que se propagam pelos pares (sinal transmitido) induzem correntes parasitas (ruído) na blindagem. Esse efeito leva a uma perda adicional (atenuação) no sinal transmitido por aumentar a resistência em corrente alternada dos condutores do cabo. Esse efeito pode ser expresso em termos matemáticos por meio da expressão a seguir.

$$R_{shield,ac} = 0,8 \left(\sqrt{u} - \frac{1}{2} \right) \cdot R_{shield,dc} \quad [10]$$

Na expressão [10], u é a frequência normalizada com base em características construtivas dos pares balanceados.

A atenuação de cabos de cobre varia em função da frequência, temperatura do ambiente de operação,

O termo "perda de inserção" (IL, *Insertion Loss*) é adotado para descrever uma atenuação de sinal ao longo dos canais, enlaces e componentes. Diferentemente da atenuação, a perda de inserção não é linearmente proporcional ao comprimento do cabo devido à presença de componentes e segmentos de cabos que adicionam suas próprias perdas a um canal completo.

É importante explicar que "perda de inserção" não é um parâmetro elétrico e sim uma forma de expressar a atenuação (que é um parâmetro elétrico de transmissão) para um enlace ou canal.

Essa perda de potência de sinal em cabos de cobre ocorre devido às perdas resistivas dos condutores ao longo da linha (aumento da resistência em função do comprimento), à capacitância mútua entre os condutores em um par e à capacitância entre os condutores e a terra.