

# Propagação

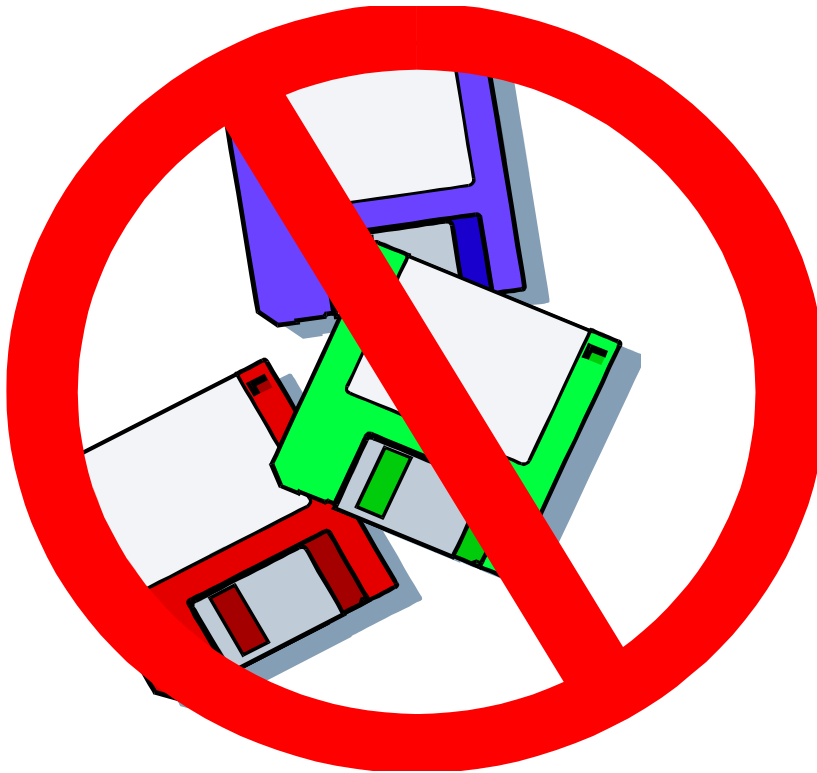
## Zona de Fresnel

SEL 371 Sistemas de Comunicação

Amílcar Careli César  
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

# Atenção!

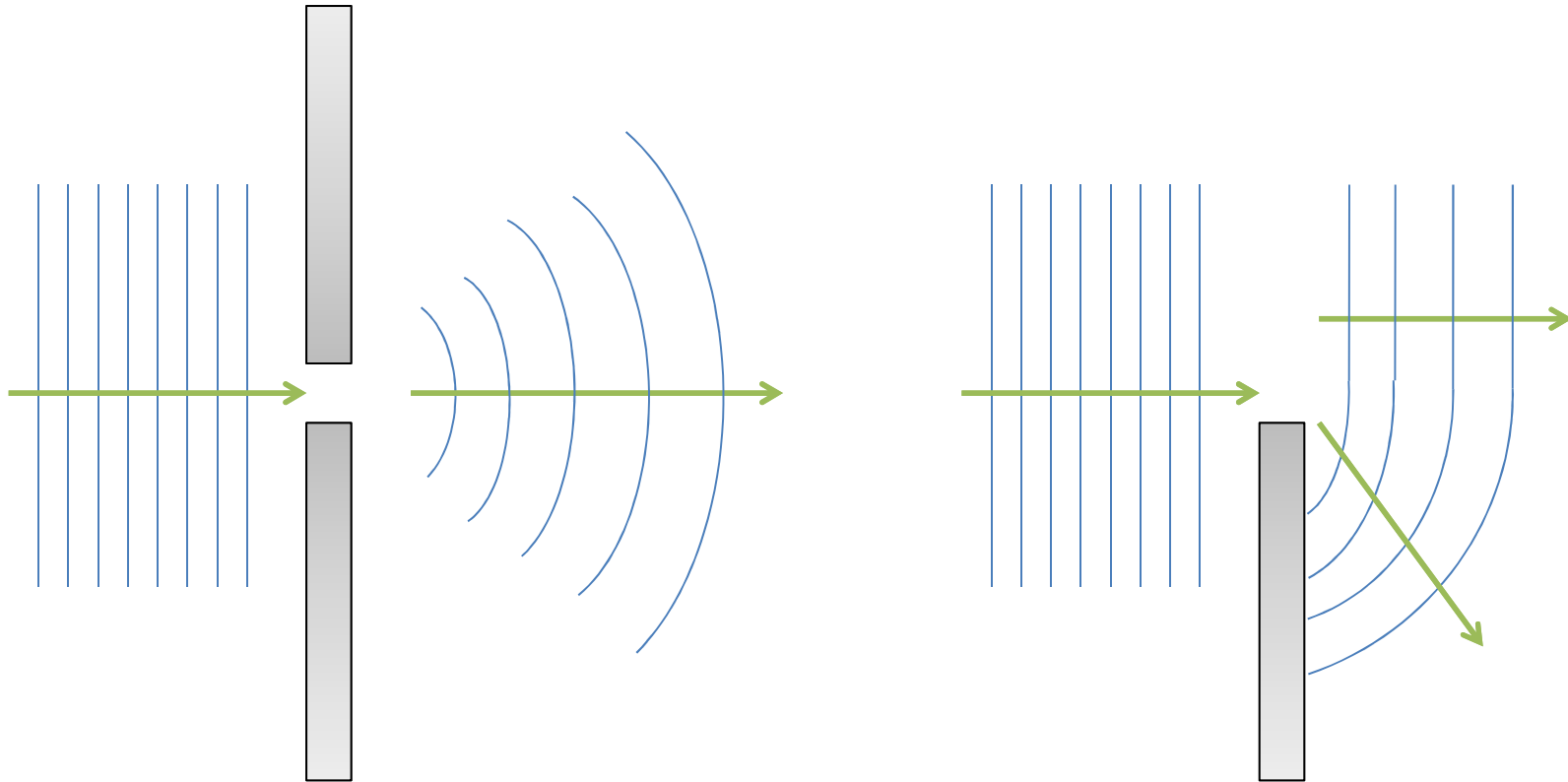
---



- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-371 Sistemas de comunicação**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica e engenharia de computação.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

# Difração

---

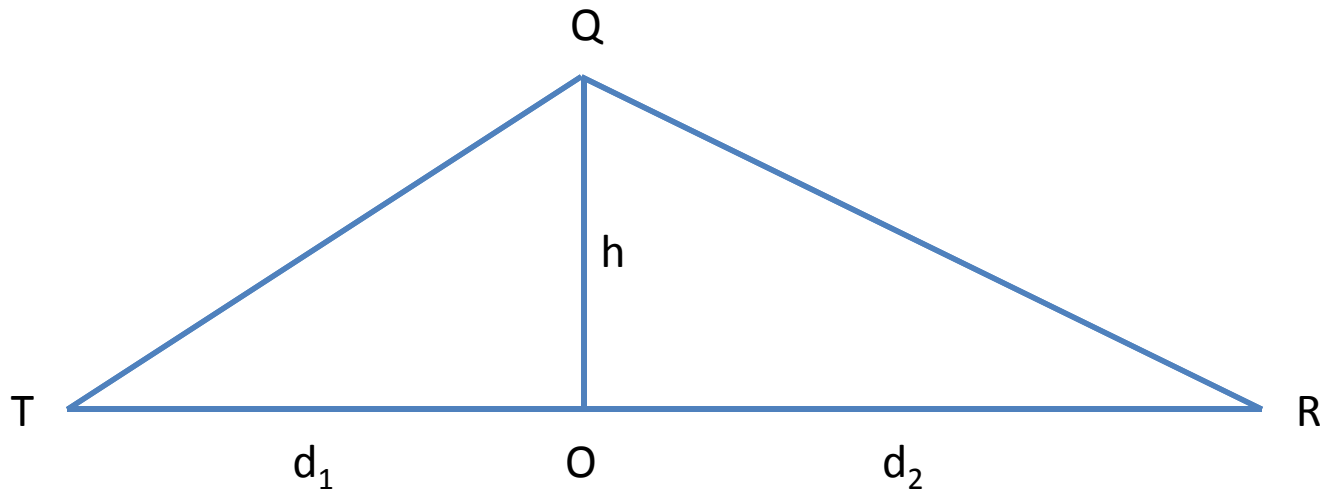


## Princípio de Huygens

Todos os pontos de uma onda são fontes pontuais para a propagação de ondas eletromagnéticas elementares

# Diferença entre caminhos (1)

---



$$\Delta R = |\overline{TQR}| - |\overline{TOR}|$$

$$|\overline{TQR}| = \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2}$$

$$|\overline{TOR}| = d_1 + d_2$$

## Diferença entre caminhos (2)

---

$$|\overline{TQR}| = \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2} ; |\overline{TOR}| = d_1 + d_2$$

$$\Delta R = \begin{cases} |\overline{TQR}| - |\overline{TOR}| \\ \sqrt{d_1^2 + h^2} + \sqrt{d_2^2 + h^2} - (d_1 + d_2) \\ d_1 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_1}\right)^2} + d_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_2}\right)^2} - (d_1 + d_2) \end{cases}$$

## Diferença entre caminhos (3)

---

$$\Delta R = d_1 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_1}\right)^2} + d_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_2}\right)^2} - (d_1 + d_2)$$

aproximação binomial:  $\sqrt{1+x} \simeq 1 + \frac{x}{2}$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_1}\right)^2} \simeq 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{d_1}\right)^2$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_2}\right)^2} \simeq 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{d_2}\right)^2$$

---


$$\sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_1}\right)^2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{d_1}\right)^2 ; \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_2}\right)^2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{d_2}\right)^2$$

$$\Delta R = \begin{cases} d_1 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_1}\right)^2} + d_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{d_2}\right)^2} - (d_1 + d_2) \\ d_1 + \frac{d_1}{2} \left(\frac{h}{d_1}\right)^2 + d_2 + \frac{d_2}{2} \left(\frac{h}{d_2}\right)^2 - (d_1 + d_2) \\ \frac{h^2}{2} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right) \end{cases}$$

## Diferença de fase entre os 2 percursos

---

$$\Delta R = \frac{h^2}{2} \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)$$

$$\Delta \phi = k \Delta R = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \frac{h^2}{2} \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)$$

$$\Delta \phi = \frac{\pi}{2} h^2 \left[ \frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]$$



# Parâmetro de difração Fresnel-Kirchhoff

---

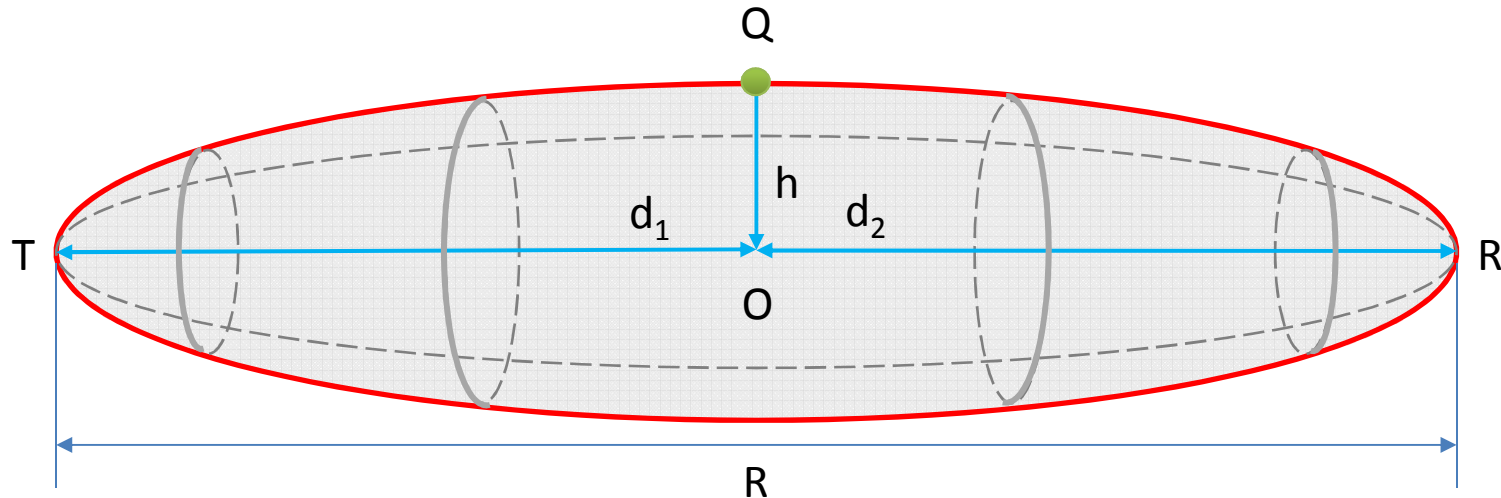
$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} h^2 \left[ \frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]$$

$$v \equiv h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \text{ adimensional}$$

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} v^2$$

diferença de fase entre os 2 percursos

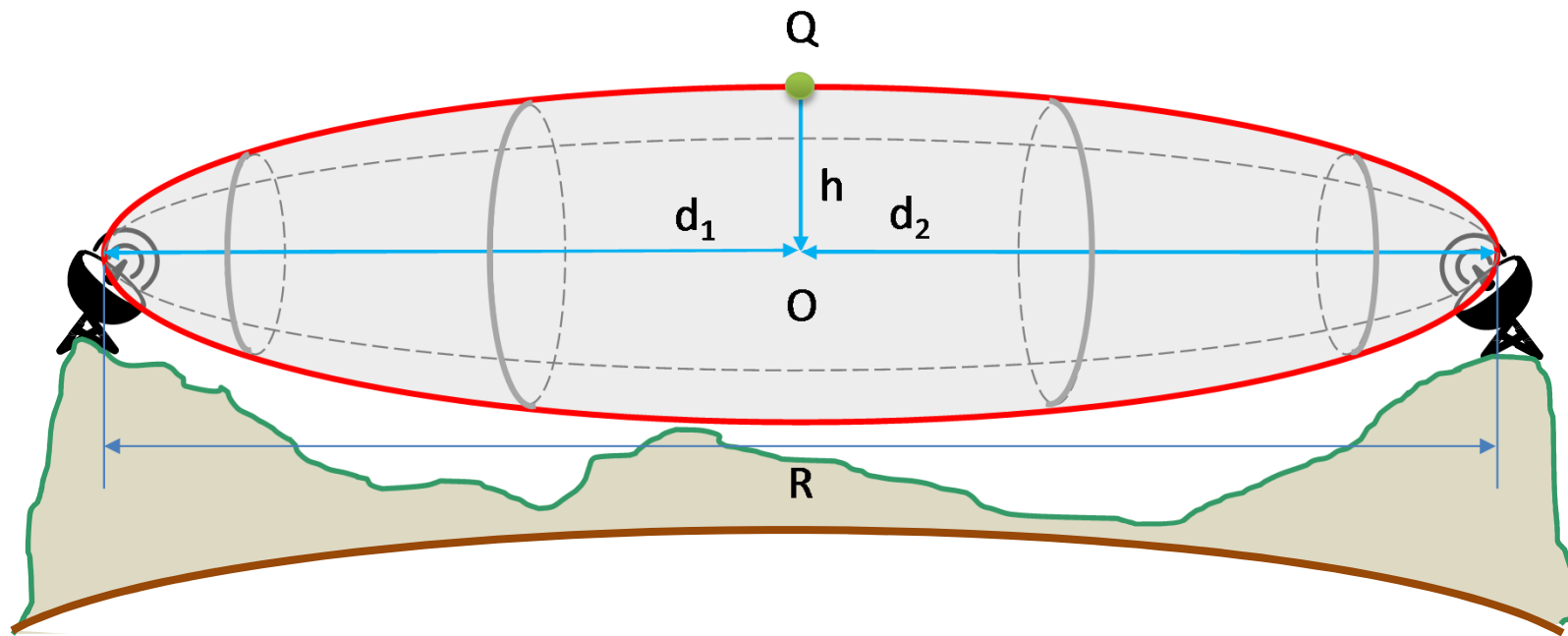
# Zona de Fresnel (1)



- ✓ Família de círculos com propriedade tal que o percurso total de T a R, passando por cada círculo, é  $\Delta R = q\lambda/2$ ;  $q$  inteiro.
- ✓ O caminho passando por cada círculo é mais longo que o caminho TOR.
- ✓ O conjunto de pontos define um elipsoide para qual TOR é eixo de revolução.

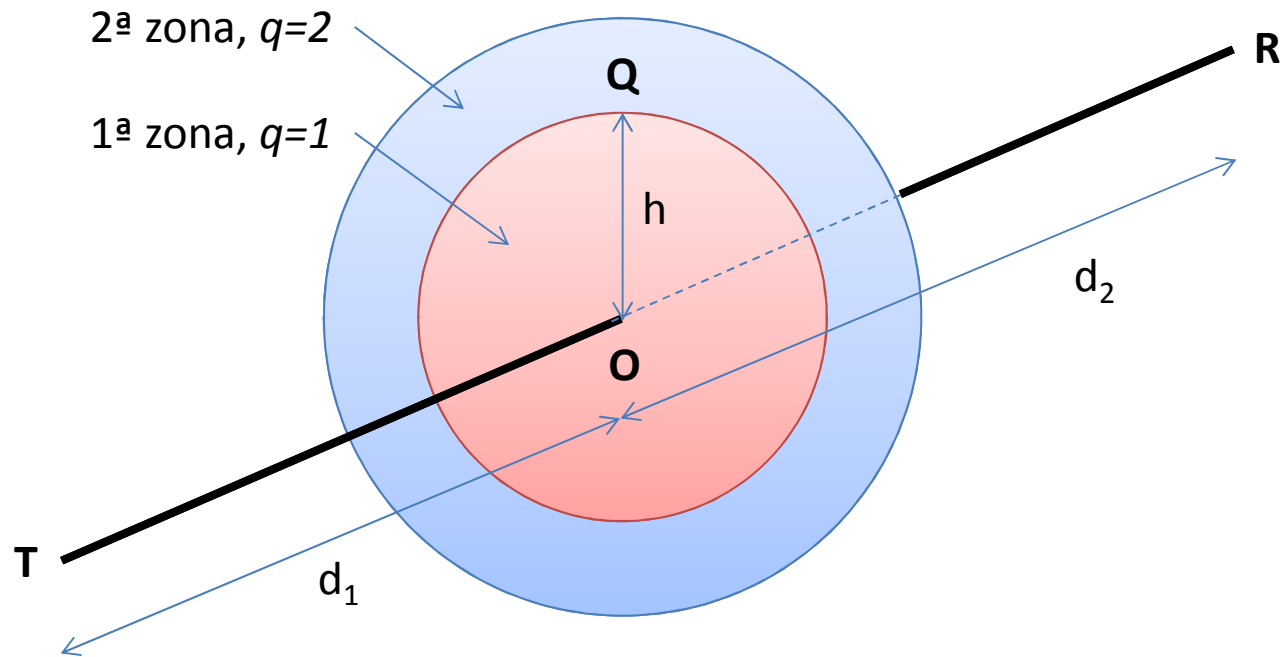
# Zona de Fresnel (2)

---

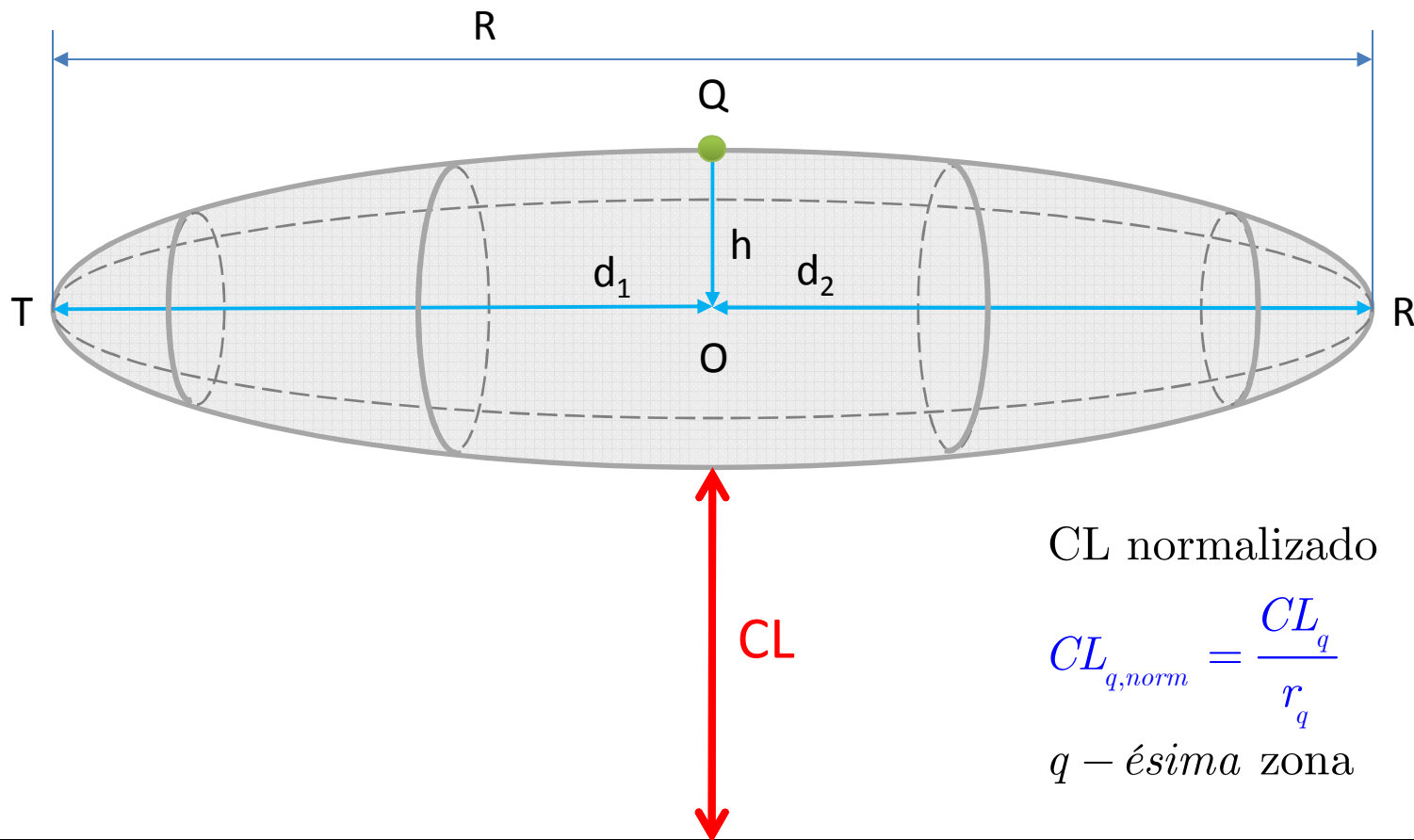


# Zona de Fresnel (3)

---



# Afastamento da zona de Fresnel (CL)



CL normalizado

$$CL_{q,norm} = \frac{CL_q}{r_q}$$

$q$  – *ésima* zona

*Fresnel zone clearance (CL)*  
*Clearance: afastamento, separação*

## Raio do círculo

---

$$\Delta R = \frac{h^2}{2} \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) = q \frac{\lambda}{2}$$

raio do círculo

$$h \equiv r_q = \sqrt{q \lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \text{ m}$$

# Parâmetro de difração

---

$$v_q = \left\{ \begin{array}{l} h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \\ \sqrt{q\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \\ \sqrt{2q} \end{array} \right.$$

válido para  $d_1, d_2 \gg h = r_q$

Diferença de caminhos entre a  
*q* - *ésima* zona de Fresnel  
e a linha **TOR**

$$\frac{(q-1)\lambda}{2} \leq \Delta R \leq \frac{q\lambda}{2}$$



## Diferença de fase

---

$$\Delta\phi_q = \frac{\pi}{2} v_q^2 = \frac{\pi}{2} 2q = q\pi$$

$$(q-1)\pi \leq \Delta\phi \leq q\pi$$

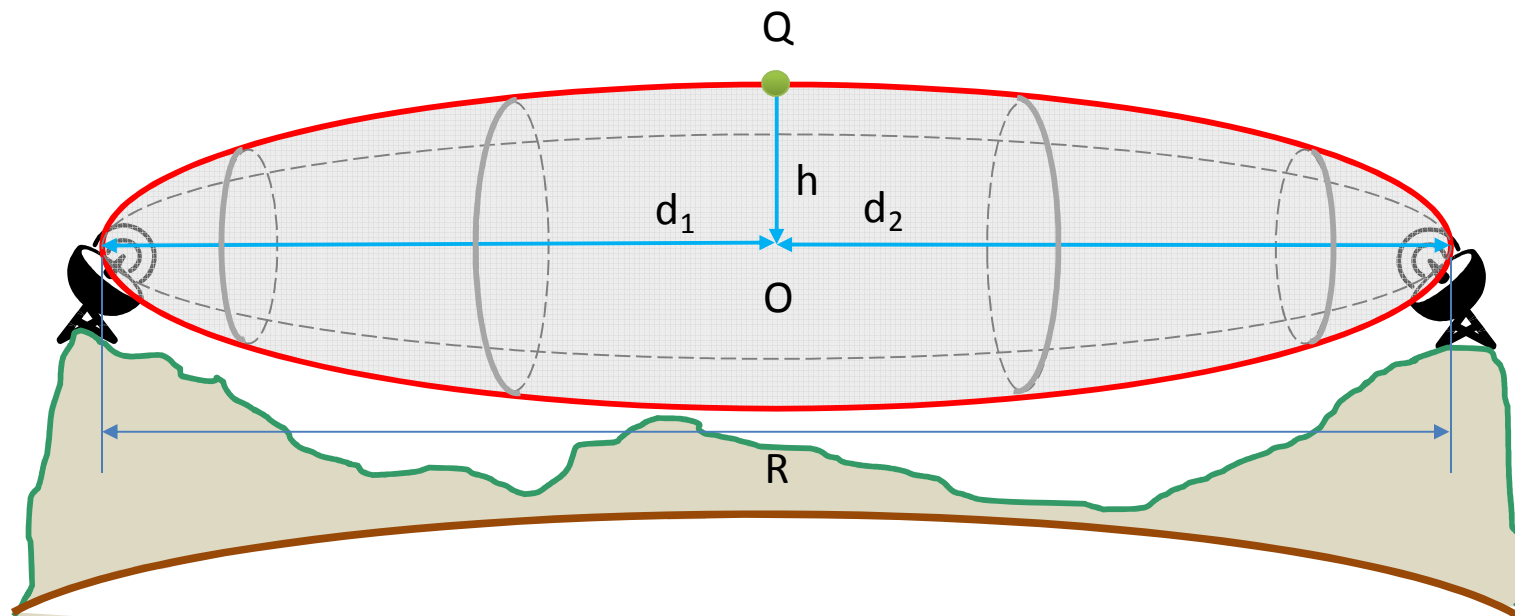
para  $q = 1$ ,  $0 \leq \Delta\phi \leq \pi$

para  $q = 2$ ,  $\pi \leq \Delta\phi \leq 2\pi$

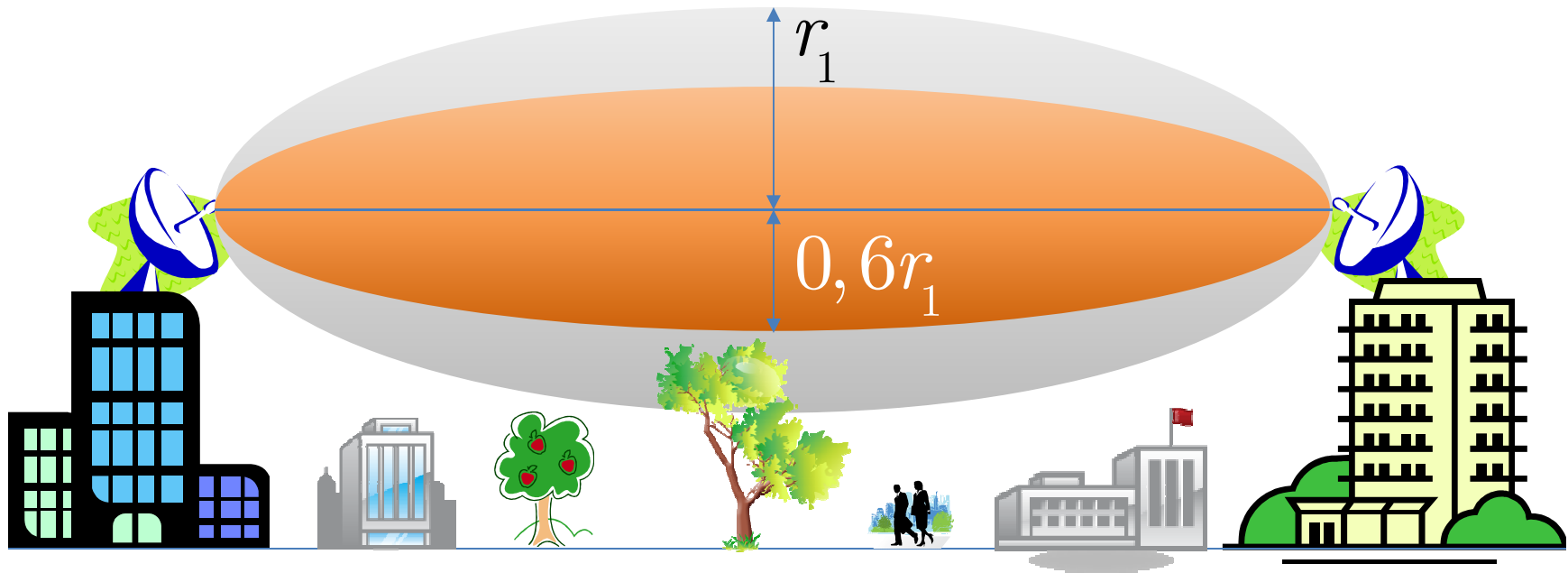
oposição de fase: interferência destrutiva

# Regra

Manter a 1ª zona de Fresnel livre de obstáculos  
Garantia de propagação em condições de espaço-livre  
Grande parte da energia do sinal está contido nesse volume



# Regra: 60%



Manter 60% da 1ª zona de Fresnel livre de obstáculos

Bloqueio admitido que não causa efeito pronunciado na degradação do sinal