

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - FÍSICA 2

AUTOR: ANTÔNIO DUARTE PEREIRA JUNIOR - 2019

NOTAS DE AULA BASEADAS EM:

- FÍSICA, UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA VOLUME 3, 2ª EDIÇÃO, RANDALL D. KNIGHT,
- CURSO DE FÍSICA BÁSICA, VOLUME 3, ELETROMAGNETISMO, H. MOYSÉS NUSSENZVEIG (1ª EDIÇÃO).
- FUNDAMENTALS OF PHYSICS, 10TH EDITION, HALLIDAY, RESNICK AND WALKER.
- FÍSICA: UM CURSO UNIVERSITÁRIO, VOLUME 2, 10ª REIMPRESSÃO, ALONSO E FINN.
- CURSO DE FÍSICA DE BERKELEY, VOLUME 2, ELETRICIDADE E MAGNETISMO, E. PURCELL
- THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS, VOLUME 2, FEYNMAN, LEIGHTON AND SANDS.

CAP 1: CARGAS ELÉTRICAS E FORÇAS

1) CARGA ELÉTRICA:

EXPERIMENTOS COTIDIANOS COMO A ATRAÇÃO DE OBJETOS BEM LEVES POR UM PENTE DE CABELO RECÉM UTILIZADO, SÃO ANÁLOGOS À OBSERVAÇÕES FEITAS NA ANTIGUIDADE, ONDE PEDAÇOS DE ÂMBAR ATRITADOS COM PELE ANIMAL SE MOSTRAVAM CAPAZES DE ATRAIR PEDAÇOS DE PALHA OU PENA.

NAS DUAS SITUAÇÕES DESCRITAS, A ATRAÇÃO DE OBJETOS LEVES POR UM DADO MATERIAL OCORREU APÓS O ATRITO DOS REFERIDOS MATERIAIS COM OUTRO MATERIAL, COMO CABELO OU PÉLO.

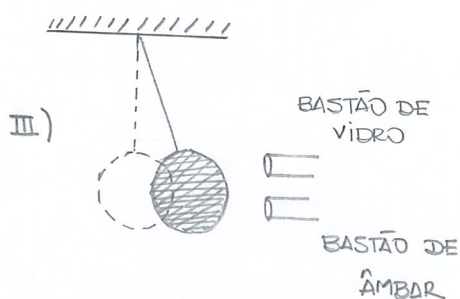
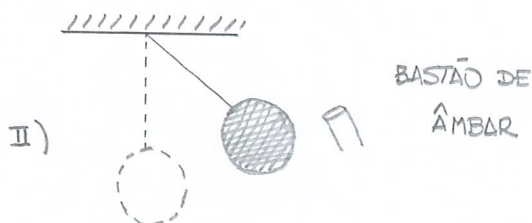
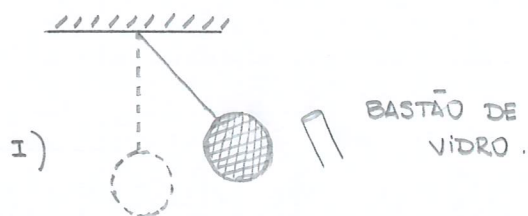
ANTES DE ATRITÁ-LOS, ERA POSSÍVEL VERIFICAR QUE OS OBJETOS LEVES NÃO ERAM ATRAÍDOS. PORTANTO, O PROCESSO DE ATRITO É RESPONSÁVEL POR PROMOVER A MUDANÇA DE ALGUMA PROPRIEDADE DO MATERIAL. ESTA PROPRIEDADE É O VALOR TOTAL DE SUA CARGA ELÉTRICA*.

APÓS A CONSTATAÇÃO DESTES FATOS EXPERIMENTAIS, PODEMOS VERIFICAR UM SEGUNDO FATOS ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS SIMPLES:

- CONSIDEREMOS UMA PEQUENA BOLA DE MATERIAL LEVE,
- ELETRIZEMOS POR ATRITO UM BASTÃO DE ÂMBAR E UM BASTÃO DE VIDRO,

* DIZEMOS QUE O OBJETO ATRITADO ESTÁ ELETRIZADO.

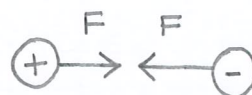
OBSERVEMOS AS SEGUINTE SITUACÖES :



PELAS SITUACÖES I E II, VEMOS QUE TANTO O BASTÃO DE VIDRO QUANTO O DE ÂMBAR, QUANDO ELETRIZADOS, ATRAEM A BOLA. POR OUTRO LADO, NA SITUAÇÃO III, QUANDO APROXIMADOS SIMULTANEAMENTE À BOLA, A ATRAÇÃO É MUITO MENOR (PODENDO SER ATÉ NULA). ISTO NOS PERMITE CONCLUIR QUE OS EFEITOS PRODUZIDOS POR UM DOS BASTÖES SOBRE A BOLA SÃO (PARCIALMENTE) COMPENSADOS PELO OUTRO BASTÃO. LOGO, EXISTEM, PELO MENOS, DOIS TIPOS DE CARGA ELÉTRICA. ESSES DIFERENTES TIPOS DE CARGA SERÃO DENOMINADOS POR POSITIVO E NEGATIVO.

NOTA : NUNCA FOI ENCONTRADO UM MATERIAL QUE, QUANDO ELETRIZADO, PUDESSE COMPENSAR TANTO OS EFEITOS DO BASTÃO DE VIDRO, QUANTO OS DO BASTÃO DE ÂMBAR. NESTE SENTIDO, ESTE MATERIAL DEVE TER O MESMO TIPO DE CARGA OU DO BASTÃO DE VIDRO OU DO BASTÃO DE ÂMBAR.

POR SIMPLICIDADE, TOMAREMOS OBJETOS DE DIMENSÖES DESPREZÍVEIS QUE ESTEJAM ELETRIZADOS, I.E., POSSUEM CARGA POSITIVA OU NEGATIVA. CHAMAREMOS TAIS OBJETOS DE CARGAS PUNTIFORMES, AS SEGUINTE S PROPRIEDADES SÃO VERIFICADAS :



PORTANTO, CONCLUÍMOS QUE CARGAS DO MESMO TIPO (MESMO SINAL) SE REPELEM ENQUANTO CARGAS DE TIPOS DIFERENTES (SINAIS DISTINTOS SE ATRAEM).

NOTA : A DISCUSSÃO ANTERIOR NOS PERMITE CONCLUIR QUE CARGAS ELÉTRICAS EXERCEM FORÇAS SOBRE OUTRAS. TAIS FORÇAS SÃO EXERCIDAS À DISTÂNCIA. DIZEMOS, PORTANTO, QUE É UMA FORÇA DE CAMPO

→ SIMILARIDADE COM A FORÇA GRAVITACIONAL.

DEVEMOS DISCUTIR ALGUMAS OUTRAS PROPRIEDADES SOBRE CARGAS ELÉTRICAS:

LEI DA CONSERVAÇÃO DA CARGA:

ANTES DE ENUNCIARMOS A LEI DE CONSERVAÇÃO DA CARGA, DEFINIREMOS A CARGA TOTAL DE UM SISTEMA.

DEF:



SEJA UM SISTEMA S COMPOSTO POR N CARGAS PONTIFORMES q_1, \dots, q_N . A CARGA TOTAL Q DO SISTEMA É, POR DE-

FINIÇÃO, A SOMA ALGÉBRICA DE TODAS AS CARGAS, I.E.,

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i$$

COM ESTA DEFINIÇÃO, PODEMOS ENUNCIAR A LEI DE CONSERVAÇÃO DE CARGA:

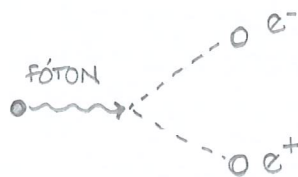
EM UM SISTEMA ISOLADO, I.E., ONDE NÃO HÁ TROCA DE MATÉRIA, O VALOR DA CARGA TOTAL NÃO VARIA COM O TEMPO.

ISTO IMPLICA QUE CARGAS ELÉTRICAS NÃO PODEM SER CRIADAS OU DESTRUÍDAS EM UM SISTEMA ISOLADO

NOTA (EFEITOS QUÂNTICOS; ANTIMATÉRIA):

EM UM SISTEMA ISOLADO, LUZ PODE ENTRAR OU SAIR SEM VIOLAR A LEI DE CONSERVAÇÃO. OS FÓTONS, "PARTÍCULAS QUE COMPÕE A LUZ", SÃO NEUTROS, I.E., TÊM

CARGA ELÉTRICA NULA. EFEITOS QUÂNTICOS PERMITEM A CONVERSÃO DE UM FÓTON EM UM PAR ELÉTRON - PÓSITRON (ANTI-ELÉTRON). APESAR DE A CRIAÇÃO DE PARTÍCULAS CARGADAS, A CARGA TOTAL É NULA:



A CONSERVAÇÃO DE CARGA É VERIFICADA, POIS O ELÉTRON E SUA ANTI-PARTÍCULA POSSUEM EXATAMENTE A MESMA CARGA EM MÓDULO, MAS COM SINAIS OPOSTOS.

QUANTIZAÇÃO DA CARGA:

- CARGA ELÉTRICA: ASPECTOS MICROSCÓPICOS.

COMO É BASTANTE CONHECIDO, ÁTOMOS SÃO COMPOSTOS POR UM NÚCLEO E UMA NUVEM ELETRÔNICA.



OS ELÉTRONS SÃO PORTADORES DE CARGAS NEGATIVAS, ENQUANTO OS PRÓTONS TÊM CARGA DE MESMO MÓDULO, MAS SINAL POSITIVO.

UM ÁTOMO COM O MESMO NÚMERO DE ELÉTRONS E PRÓTONS TEM CARGA TOTAL NULA E, PORTANTO, É NEUTRO.

A CARGA ELÉTRICA DE UM ELÉTRON / PRÓTON É UMA PROPRIEDADE INTRÍNSECA À ESSAS PARTÍCULAS. O VALOR EM MÓDULO É DENOTADO POR e E É CHAMADA DE UNIDADE FUNDAMENTAL DE CARGA.

PRÓTONS E ELÉTRONS SÃO OS CONSTITUINTES BÁSICOS DA MATÉRIA. LOGO, O PROCESSO DE SE ELETRIZAR UM BASTÃO DE VIDRO POR ATRITO, DEVE SER COMPLETAMENTE COMPREENDIDO EM TERMOS DE PRÓTONS E ELÉTRONS.

ASSIM, A CARGA DE UM MATERIAL É DADA POR

$$q = N_p e - N_e e$$

NÚMERO DE PRÓTONS NÚMERO DE ELÉTRONS.

UM OBJETO É DITO NEUTRO SE $q = 0$ OU

$$N_p = N_e$$

NOTA: VEJA QUE UM OBJETO É DITO NEUTRO SE SUA CARGA RESULTANTE É NULA. ISTO, PORÉM, É DIFERENTE DE DIZER QUE O OBJETO NÃO POSSUE CARGAS.

CASO $N_e \neq N_p$, O OBJETO É DITO CARREGADO E O SINAL DA CARGA DEPENDE SE O NÚMERO DE ELÉTRONS É MAIOR OU MENOR QUE O NÚMERO DE PRÓTONS. INDEPENDENTEMENTE DE O SINAL, O MÓDULO DA CARGA É SEMPRE UM MÚLTIPLO DE e . EM RESUMO: O VALOR DA CARGA DE UM OBJETO PODE SOFRER, SOMENTE, VARIACÕES DISCRETAS. ISTO É O QUE SE CONHECE COMO QUANTIZAÇÃO DA CARGA.

O PROCESSO DE ELETRIZAÇÃO É RESPONSÁVEL POR PRODUIR $N_p \neq N_e$. NA PRÁTICA, ESSE DESBALANÇO É PRODUZIDO PELO GANHO OU PERDA DE ELÉTRONS.

NOTA: QUARKS SÃO PARTÍCULAS QUE COMPÕE PRÓTONS E NEUTRONS. É CONHECIDO QUE TAIS PARTÍCULAS TÊM CARGAS ELÉTRICAS QUE CORRESPONDEM A UMA FRAÇÃO DA CARGA ELEMENTAR. ENTRETANTO, ESSAS PARTÍCULAS SE ENCONTRAM SEMPRE CONFINADAS EM ESTRUTURAS CUJA CARGA RESULTANTE É UM MÚLTIPLO INTEIRO DA CARGA ELEMENTAR.

CONDUTORES E ISOLANTES

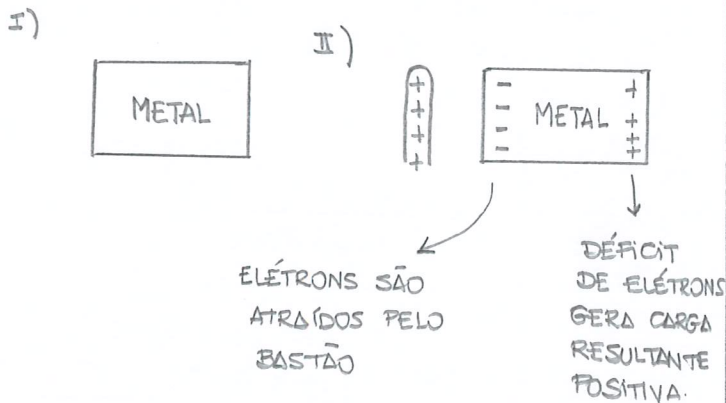
TÍPICAMENTE, PODEMOS CLASSIFICAR DIFERENTES MATERIAIS EM DOIS TIPOS, QUANTO ÀS SUAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS: CONDUTORES OU ISOLANTES.

NO CASO DOS ISOLANTES, OS ELÉTRONS SÃO FORTEMENTE LIGADOS AO NÚCLEO E, PORTANTO, NÃO SÃO LIVRES PARA SE MOVIMENTAR. JÁ NOS CONDUTORES, OS ELÉTRONS SÃO LIGADOS AO NÚCLEO FRACAMENTE E TORNAM-SE LIVRES PARA SE MOVER ATRAVÉS DO MATERIAL.

NOTA: DEVIDO A MOBILIDADE DE CARGAS EM CONDUTORES, EM UM CONDUTOR ISOLADO, O EXCESSO DE CARGA SE LOCALIZARÁ SOBRE A SUPERFÍCIE DO CONDUTOR, APÓS UM INTERVALO DE TEMPO SUFICIENTEMENTE LONGO.

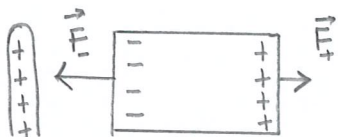
FORÇA DE POLARIZAÇÃO :

CONSIDEREMOS UM OBJETO METÁLICO (CONDU-
TOR) NEUTRO. DEVIDO A MOBILIDADE DOS
ELÉTRONS NESTE OBJETO, AO APROXIMARMOS
UM BASTÃO ELETRIZADO DESTE OBJETO,
VERIFICAREMOS UMA SEPARAÇÃO DAS CAR-
GAS, COMO INDICA A FIGURA ABAIXO.



NA SITUAÇÃO II, VEMOS QUE A CARGA RE-
SULTANTE DO METAL É NULA, MAS DIZEMOS
QUE O OBJETO FOI POLARIZADO.

PODEMOS VERIFICAR, PORTANTO, O SEGUINTE
EFEITO :



A FORÇA DE ATRAÇÃO \vec{F}_- É MAIS INTENSA
QUE A FORÇA DE REPULSÃO \vec{F}_+ (VEREMOS
QUE A FORÇA ELÉTRICA DEPENDE DO IN-
VERSO - DO QUADRADO - DA DISTÂNCIA).

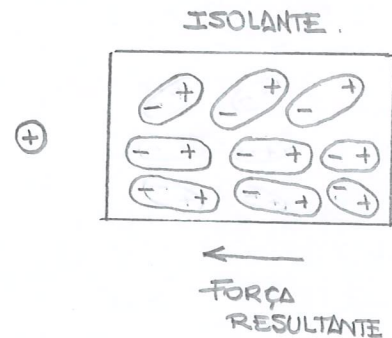
LOGO, APESAR DE O METAL ESTAR NEU-
TRO, HÁ UMA FORÇA ELÉTRICA RESUL-
TANTE DEVIDO A POLARIZAÇÃO DAS
CARGAS. ESSA FORÇA É CHAMADA DE
FORÇA DE POLARIZAÇÃO.

DIPOLO ELÉTRICO :

APÓS PENTEARMOS O CABELO, É POSSÍ-
VEL VERIFICAR QUE O PENTE É CAPAZ DE
ATRAIR PEQUENOS PEDACOS DE PAPEL, QUE
NÃO SÃO CONDUTORES. PORTANTO, A EXPLI-
CAÇÃO DESCRITA NA SEÇÃO ANTERIOR TOR-
NA-SE INADEQUADA. ENTRETANTO, CONSIDE-
REMOS O EFEITO DE APROXIMAR UMA
CARGA ELÉTRICA A UM ÁTOMO NEUTRO,

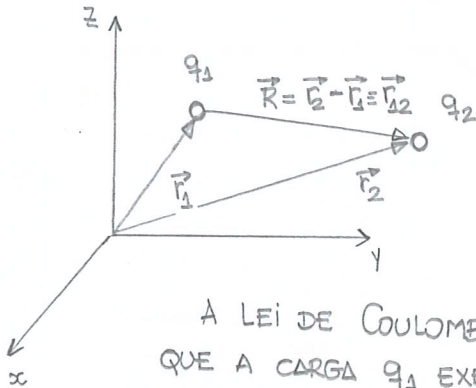


VEMOS NA SITUAÇÃO II QUE O ÁTOMO É
POLARIZADO. DIZEMOS QUE DUAS CARGAS
OPOSTAS SEPARADAS POR UMA PEQUENA
DISTÂNCIA FORMAM UM DIPOLO ELÉTRICO. NO-
VAMENTE, ESSA ESTRUTURA GERA UMA
FORÇA DE POLARIZAÇÃO. COMO EM UM
ISOLANTE AS CARGAS NEGATIVAS NÃO TEM
MOBILIDADE, O EFEITO RESULTANTE É
REPRESENTADO POR,



2) LEI DE COULOMB:

CONSIDEREMOS UM REFERENCIAL INERCIAL EM RELAÇÃO AO QUAL, DUAS CARGAS q_1 E q_2 ENCONTRAM-SE EM REPOUSO CONFORME DISPÕE A FIGURA ABAIXO:



A LEI DE COULOMB ESTABELECE QUE A CARGA q_1 EXERCE SOBRE A CARGA q_2 UMA FORÇA DE MÓDULO F_{21} DADA POR

$$|\vec{F}_{21}| = k \frac{|q_1| |q_2|}{|\vec{r}_{12}|^2}$$

CONSTANTE DE PROPORCIONALIDADE (POSITIVA)

O VETOR FORÇA ELÉTRICA CORRESPONDENTE À FORÇA EXERCIDA POR q_1 SOBRE q_2 É:

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \hat{r}_{12} = -\vec{F}_{12}$$

ONDE $\hat{r}_{12} = \vec{r}_{12} / |\vec{r}_{12}|$

OBSERVAÇÕES:

- 1) A FORÇA ENTRE q_1 E q_2 DEPENDE DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA DE SEPARAÇÃO DAS CARGAS.
- 2) O VALOR DA FORÇA É DIRETAMENTE PROPORCIONAL À INTENSIDADE DAS CARGAS.

3) O VERSOR \hat{r}_{12} APONTA DA CARGA 1 P/ A CARGA 2. PORTANTO, SE AMBAS AS CARGAS POSSUÍREM O MESMO SINAL, O SENTIDO DA FORÇA QUE 1 FAZ EM 2 E VICE-VERSA, É DE REPULSÃO.

4) SE AS CARGAS TÊM SINAIS OPOSTOS, ENTÃO HAVERÁ UM SINAL NEGATIVO RESULTANTE, GERANDO UMA MUDANÇA DE SENTIDO EM \hat{r}_{12} E, PORTANTO, UMA FORÇA DE ATRAÇÃO.

NOTA: A VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DE QUE A LEI DE COULOMB DEPENDE DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA É BASTANTE PRECISA. PARAMETRIZANDO O DESVIO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA POR $1/|\vec{r}_{12}|^{2+\epsilon}$, VERIFICA-SE QUE $|\epsilon| < 3 \times 10^{-16}$.

EM APLICAÇÕES PRÁTICAS, ADOTAMOS O SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS, ONDE DISTÂNCIA É MEDIDA EM METRO, MASSA EM KG, TEMPO EM SEGUNDOS. NESSE SISTEMA, CARGA ELÉTRICA É MEDIDA EM COULOMB (C) E A CONSTANTE DE PROPORCIONALIDADE k É

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 8,99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

PERMISSIVIDADE DO VÁCUO.

PORTANTO,

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|^2} \hat{r}_{12}$$

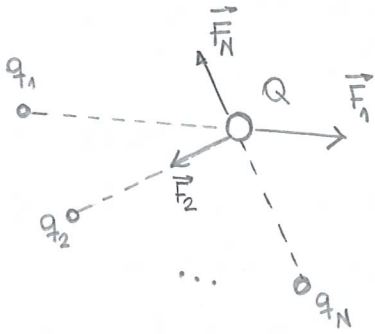
NOTA:

A CARGA ELÉTRICA ELEMENTAR e TEM O SEGUINTE VALOR EM COULOMB:

$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO :

DADO UM CONJUNTO DE CARGAS q_1, \dots, q_N . A FORÇA RESULTANTE SOBRE UMA CARGA Q É SIMPLEMENTE A SOMA VETORIAL DAS FORÇAS EXERCIDAS POR CADA CARGA q_i COMO SE AS OUTRAS CARGAS NÃO ESTIVESSEM PRESENTES, I.E.,

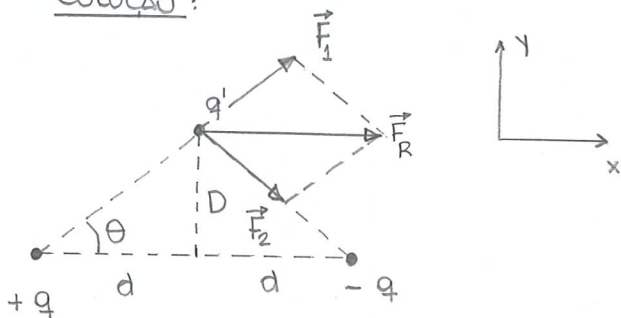


$$\vec{F}_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 Q}{|\vec{r}_1|^2} \hat{r}_1 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 Q}{|\vec{r}_2|^2} \hat{r}_2 + \dots + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_N Q}{|\vec{r}_N|^2} \hat{r}_N$$

Ex: (MOYSES)

DUAS CARGAS PUNTIFORMES $+q$ E $-q$ ESTÃO SITUADAS NO VÁCUO, SEPARADAS POR UMA DISTÂNCIA $2d$. COM QUE FORÇA ATUAM SOBRE UMA TERCEIRA CARGA q' , SITUADA SOBRE A MEDIATRIZ DO SEGMENTO QUE LIGA AS DUAS CARGAS, A UMA DISTÂNCIA D DO PONTO MÉDIO DESTES SEGMENTO ?

SOLUÇÃO :



PELO PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO,

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

POR SIMETRIA, AS COMPONENTES VERTICAIS DE \vec{F}_1 E \vec{F}_2 SE ANULAM. PORTANTO, SOMENTE AS COMPONENTES HORIZONTAIS PRODUZEM RESULTANTE NÃO-TRIVIAL.

$$\vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x} = \vec{F}_R$$

COMO AS CARGAS DA BASE SÃO IGUAIS EM MÓDULO, ENTÃO

$$\vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x} = 2\vec{F}_{1x}$$

$$F_{1x} = F_1 \cos\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q'}{(d^2 + D^2)^2} \cos\theta$$

MAS,

$$\cos\theta = \frac{d}{\sqrt{d^2 + D^2}}$$

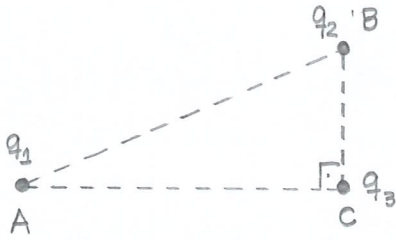
LOGO :

$$|\vec{F}_R| = \frac{1}{2} \frac{q q'}{4\pi\epsilon_0 (d^2 + D^2)^2} \frac{d}{\sqrt{d^2 + D^2}} \times 2$$

$$\Rightarrow \vec{F}_R = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q q' d}{(d^2 + D^2)^{3/2}} \hat{x}$$

EX: (ALONSO E FINN)

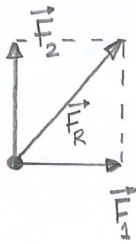
CONSIDERE A DISTRIBUIÇÃO DE CARGA DA FIGURA ABAIXO:



SABENDO-SE QUE $q_1 = 1,5 \times 10^{-3} \text{ C}$,
 $q_2 = -0,5 \times 10^{-3} \text{ C}$ E $q_3 = 0,2 \times 10^{-3} \text{ C}$ E
QUE $AC = 1,2 \text{ m}$, $BC = 0,5 \text{ m}$, DETER-
MINE A FORÇA RESULTANTE SOBRE q_3 .

SOLUÇÃO:

COMO q_1 E q_3 TÊM O MESMO SINAL,
ENTÃO q_1 EXERCERÁ UMA FORÇA DE RE-
PULSÃO SOBRE q_3 . JÁ q_2 , POR TER SI-
NAL OPOSTO AO DE q_3 , EXERCERÁ UMA
FORÇA DE ATRAÇÃO SOBRE q_3 . PORTAN-
TO, O DIAGRAMA DE FORÇAS QUE ATUAM
SOBRE q_3 É DADO POR



$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad \text{PELO PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO.}$$

$$|\vec{F}_R| = \sqrt{|\vec{F}_1|^2 + |\vec{F}_2|^2}$$

$$|\vec{F}_1| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_3|}{(AC)^2}$$
$$= \frac{(8,99 \times 10^9)(1,5 \times 10^{-3})(0,2 \times 10^{-3})}{(1,2)^2}$$

$$= 1,87 \times 10^3 \text{ N}$$

$$|\vec{F}_2| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_2||q_3|}{(BC)^2}$$
$$= \frac{(8,99 \times 10^9)(0,5 \times 10^{-3})(0,2 \times 10^{-3})}{(0,5)^2}$$
$$= 3,57 \times 10^3 \text{ N}$$

LOGO,

$$|\vec{F}_R| = \sqrt{|\vec{F}_1|^2 + |\vec{F}_2|^2} = 4,05 \times 10^3 \text{ N}$$