# Sobre Desenvolvimentos em Séries de Potências, Séries de Taylor e Fórmula de Taylor

**Pedro Lopes**
**Departamento de Matemática**
**Instituto Superior Técnico**
**1o. Semestre 2005/2006**

Estas notas constituem um material de apoio ao curso de Análise Matemática II para as licenciaturas de Engenharia Geológica e Mineira, Engenharia de Materiais e Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico no 1o. semestre de 2005/2006 e não pretendem ser um substituto dos manuais escolares disponíveis.

# 1 Alguns Desenvolvimentos em Séries de Potências

Seja $x$ um número real (não nulo) e considere-se a sucessão

$$u_n = x^n \qquad n \geq 0$$

Considere-se uma nova sucessão, obtida de $u_n$, que designamos por $S_N$, que para cada $N$ é a soma dos $N+1$ primeiros termos de $u_n$, de $n=0$ até $n=N$, isto é,

$$S_N = x^0 + x^1 + x^2 + x^3 + \cdots + x^{N-1} + x^N = \sum_{n=0}^{N} x^n$$

Embora seja fácil compreender o seu significado (soma dos $N+1$ primeiros termos da sucessão $u_n$), tal como a sucessão $S_N$ está escrita, não nos revela muito sobre o seu comportamento (é limitada?, é convergente?). Tentemos então escrevê-la de outra forma.

$$\begin{aligned} S_{N+1} = \sum_{n=0}^{N+1} x^n &= x^0 + x^1 + x^2 + \cdots + x^{N-1} + x^N + x^{N+1} = S_N + x^{N+1} \\ &= x^0 + x\Big(x^0 + x^1 + \cdots + x^{N-2} + x^{N-1} + x^N\Big) = 1 + xS_N \end{aligned}$$

donde

$$1 + xS_N = S_n + x^{N+1} \Leftrightarrow 1 - x^{N+1} = S_N - xS_N$$

e portanto,

$$S_N = \frac{1 - x^{N+1}}{1 - x} \qquad \text{para } x \neq 1$$

Consideremos desde já o caso $x = 1$:

$$S_N = \sum_{n=0}^{N} 1^N = \underbrace{1 + 1 + 1 + \cdots + 1}_{(N+1) \text{ parcelas}} = N + 1 \underset{N \mapsto \infty}{\longmapsto} \infty$$

Agora para $x \neq 1$:

$$S_N = \frac{1 - x^{N+1}}{1 - x} \underset{N \mapsto \infty}{\longmapsto} \begin{cases} \frac{1}{1-x} & \text{para } |x| < 1 \\ \text{diverge para } |x| \geq 1 \end{cases}$$

ou seja

$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n \overset{\text{def}}{=} \lim_{N \mapsto \infty} \sum_{n=0}^{N} x^n = \lim_{N \mapsto \infty} S_N = \begin{cases} \frac{1}{1-x} & \text{para } |x| < 1 \\ \text{diverge para } |x| \geq 1 \end{cases}$$

Acabámos então de ver que

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \qquad \text{para } |x| < 1$$

isto é desenvolvemos $f(x) = \frac{1}{1-x}$ em série de potências de $x$ em torno de 0, obtendo, para $|x| < 1$, $\sum_{n=0}^{\infty} x^n$. Deste desenvolvimento obtemos outros. Escrevamos então o mesmo desenvolvimento mas em ordem a uma nova variável $y$:

$$\frac{1}{1-y} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \qquad \text{válido para } |y| < 1$$

Suponhamos agora que, dada uma constante $a$, $y = x - a$; então,

$$\frac{1}{1-(x-a)} = \sum_{n=0}^{\infty} (x-a)^n \qquad \text{naturalmente válido para } |x-a| < 1$$

E se $y = -x$?

$$\frac{1}{1+x} = \frac{1}{1-(-x)} \sum_{n=0}^{\infty} (-x)^n = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n \quad \text{válido para } |-x| < 1 \ \big(\Leftrightarrow |x| < 1\big)$$

ou seja, o desenvolvimento em série de potências de $x$ de $\frac{1}{1+x}$ é:

$$\frac{1}{1+x} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n \quad \text{válido para } |x| < 1$$

E se $y = -x^2$?

$$\frac{1}{1+x^2} = \frac{1}{1-(-x^2)} = \sum_{n=0}^{\infty} (-x^2)^n = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n} \quad \text{válido para } |-x^2| < 1 \ \big(\Leftrightarrow |x| < 1\big)$$

ou seja obtivémos o desenvolvimento de

$$\frac{1}{1+x^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n} \quad \text{válido para } |x| < 1$$

Recordamos aqui que, no interior do intervalo de convergência de uma série de potências de $x$, a derivada da série é igual à série das derivadas e que a primitiva da série é igual à série das primitivas. Isto vai-nos permitir obter desenvolvimentos em série de potências de $x$ das funções $\log(1+x)$ e $\arctan(x)$. De facto,

$$\log(1+x) = P\frac{1}{1+x} \underset{|x|<1}{=} P\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n P x^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} x^{n+1} + c$$

e notando que

$$0 = \log(1+0) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(-1)^n}{n+1} 0^{n+1} + c = 0 + c$$

vem $c = 0$, donde:

$$\log(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} x^{n+1} \quad \text{para } |x| < 1$$

Tambem porque $(\arctan(x))' = \frac{1}{1+x^2}$ tem-se:

$$\arctan(x) = P\frac{1}{1+x^2} \underset{|x|<1}{=} P\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n P x^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1} + c$$

e como

$$0 = \arctan(0) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} 0^{2n+1} + c = 0 + c$$

vem

$$\arctan(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1} \quad \text{para } |x| < 1$$

**Exercício 1.1**

Calcular desenvolvimentos em série de potências de $x$ de

$$a) \quad \frac{1}{(1-x)^2} \qquad b) \quad \frac{2x}{(1-2x)^2}$$

Uma maneira de definir a função exponencial é:

$$e^x := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$$

que faz sentido para todo o $x$ real, ou melhor, como a série em questão converge para todo o número real $x$ então define um função de domínio $\mathbb{R}$. A essa função de $x$ chamamos **exponencial de** $x$. Recordemos a propósito que, se existe o limite

$$\lim_{n\mapsto\infty}\left|\frac{a_n}{a_{n+1}}\right|$$

(chamemos-lhe $R$) então a série de potências

$$\sum_{n=p}^{\infty} a_n(x-a)^n$$

converge absolutamente para todo o $x$ em $\left]a-R, a+R\right[$ e diverge para todo o $x$ em $\left]-\infty, a-R\right[\,\cup\,\left]a+R, \infty\right[$ ; a convergência em $x = \pm R$ tem que ser averiguada para cada caso específico de $a_n$.

Nesta abordagem informal, introduzamos $ix$ na definição acima de exponencial (onde $i^2 = -1$):

$$e^{ix} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!}(ix)^n$$

Notando que

$$\begin{aligned}
&i^0 = 1, \quad i^1 = i, \quad i^2 = -1, \quad i^3 = -i,\\
&i^4 = 1, \quad i^5 = i, \quad i^6 = -1, \quad i^7 = -i,\\
&\ldots
\end{aligned}$$

então para $n$ par, isto é, para $n = 2k$, para algum $k$ inteiro,

$$i^n = i^{2k} = (-1)^k$$

enquanto que para $n$ ímpar, isto é, para $n = 2k+1$, para algum $k$ inteiro,

$$i^n = i^{2k+1} = (-1)^k \cdot i$$

Assim,

$$e^{ix} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!}(ix)^n = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!}x^{2k} + i\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!}x^{2k+1}$$

e relembrando que

$$e^{ix} = \cos(x) + i\sin(x)$$

vem

$$\cos(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!}x^{2k}$$

e

$$\sin(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!}x^{2k+1}$$

## 2 Séries de Taylor

Dada uma função indefinidamente diferenciável num certo ponto $a$ interior ao seu domínio (isto é, existe e é finita a derivada de qualquer ordem de $f$ em $x = a$, $f^{(n)}(a)$) podemos sempre escrever a sua série de Taylor relativa a $a$:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n$$

Qual a relação entre esta série de Taylor e a função $f$ que usámos para calcular os coeficientes da série? Na primeira secção procurou-se mostrar entre outras coisas que funções transcendentes (no caso, exponencial, seno, coseno, logaritmo e arco de tangente) podem ser expressas como séries de potências (pelo menos nalguns subconjuntos do seu domínio) e recordou-se que as séries de potências são diferenciáveis e integráveis termo a termo evidenciando assim a importância de poder exprimir uma função à custa de uma série de potências. Retomando o assunto em discussão, seria desejável que a série de Taylor convergisse para a função que lhe deu origem, pelo menos nalguma vizinhança de $a$. Comecemos por definir

**Definição 2.1**

Uma função $f : D \subseteq \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$ diz-se **analítica num ponto** $a$ **de** $D$ se é igual a uma série de potências de $x - a$ nalguma vizinhaça de $a$, isto é, se

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (x-a)^n \qquad \text{para } x \text{ “próximo” de } a$$

Assim, e sabendo que uma série de potências pode ser diferenciada termo a termo no interior do seu intervalo de convergência, os $c_n$'s são as $n$-ésimas derivadas de $f$ em $a$ multiplicadas por $n!$:

$$f'(a) = \left( c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n (x-a)^n \right)' \Bigg|_{x=a} = 0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \Big( (x-a)^n \Big)' \Big|_{x=a} = \sum_{n=1}^{\infty} c_n n (x-a)^{n-1} \Big|_{x=a} =$$
$$= c_1 \cdot 1 + \sum_{n=2}^{\infty} c_n n (a-a)^{n-1} = c_1 + 0 = c_1$$

**Exercício 2.1**

Calcule $f^{(2)}(a)$, $f^{(3)}(a)$, $f^{(4)}(a)$ e $f^{(n)}(a)$.

Portanto, funções analíticas num ponto $a$ são indefinidamente diferenciáveis em $a$. A pergunta que fizémos acima pode agora reformular-se da seguinte maneira: Será que todas as funções indefinidamente diferenciáveis num ponto $a$ são analíticas em $a$? A resposta é não, nem todas, como o seguinte exemplo ilustra,

**Exemplo 2.1**

Seja

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{x^2}}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

Esta função é indefinidamente diferenciável em qualquer $x$, com todas as derivadas nulas em $x = 0$, isto é, $f^{(n)}(0) = 0$ qualquer que seja o $n$. A sua série de Taylor em torno de 0 (série de Mac-Laurin) será então a série idênticamente nula:

$$\sum_{n=0}^{\infty} 0 \cdot x^n = \sum_{n=0}^{\infty} 0 = 0$$

Por outro lado, $f(x)$ só é nula em $x = 0$, donde a série de Mac-Laurin de $f$ não converge para a função em nenhuma vizinhança de 0.

Como reconhecer as funções indefinidamente diferenciáveis num ponto $a$ que são analíticas nesse ponto $a$? O seguinte resultado dá-nos um critério para as distinguir:

**Teorema 2.1** *Seja $f$ indefinidamente diferenciável numa vizinhança de um ponto $a$. Se existirem um número real $M$ e uma vizinhança $V_\epsilon(a)$ tais que, para cada $x \in V_\epsilon(a)$ e para cada inteiro positivo $n$ se tenha*

$$|f^{(n)}(x)| \leq M$$

*então $f$ é igual à sua série de Taylor em torno de $a$ para todo o $x \in V_\epsilon(a)$:*

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n$$

Dem. Omitida (ver livro do Prof. Campos Ferreira) ■

Mais prosaicamente, se uma função indefinidamente diferenciável tem todas as suas derivadas **globalmente** limitadas nalguma vizinhança de $a$, então, nessa vizinhança de $a$, a função é igual a sua série de Taylor.

**Exemplo 2.2**

As funções (indefinidamente diferenciáveis) $\sin(x)$ e $\cos(x)$ são tais que as suas derivadas são sempre um das seguintes funções: $\sin(x)$, $\cos(x)$, $-\sin(x)$ ou $-\cos(x)$. Assim os módulos de tais funções, $|\sin(x)|$ e $|\cos(x)|$, são limitados por 1, qualquer que seja o $x$,

$$|\sin(x)| \leq 1, \quad |\cos(x)| \leq 1 \qquad \text{qualquer que seja o } x \text{ em } \mathbb{R}$$

# 3 Fórmula de Taylor

...e se $f$ não for indefinidamente diferenciável em $a$? Isto é, se $f$ só admitir $n$ derivadas no ponto $a$? Então vale a fórmula de Taylor

$$f(x) = f(a) + (x-a)f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2}f''(a) + \frac{(x-a)^3}{3!}f'''(a) + \cdots + \frac{(x-a)^n}{n!}f^{(n)}(a) + r_n(x)$$

onde $r_n(x)$ é uma função de $x$ tal que

$$\lim_{x \mapsto a} \frac{r_n(x)}{(x-a)^n} = 0$$

**Observação 3.1**

Se $a = 0$, a fórmula correspondente chama-se fórmula de Mac-Laurin.

**Observação 3.2**

As funções, como o resto de ordem $n$, $r_n(x)$, que, quando divididas por outra função e tomando o limite quando $x$ tende para um certo $a$ se obtem 0, têm uma designação especial:

$$f(x) = o\big(g(x)\big), \quad x \mapsto a \quad \big(\text{leia-se "f(x) é ó pequeno de g(x) quando } x \text{ tende para } a\text{"}\big) \overset{def.}{\Longleftrightarrow} \lim_{x \mapsto a} \frac{f(x)}{g(x)} = 0$$

Assim, podemos escrever

$$r_n(x) = o\big((x-a)^n\big), \quad x \mapsto a$$

## 3.1 Fórmula de Taylor com resto de Lagrange

Se $f$ for $n+1$ vezes diferenciável em $a$ tem-se a seguinte fórmula para o resto (conhecida por fórmula do resto de Lagrange):

$$r_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(x-a)^{n+1}$$

com $\xi$ estritamente entre $x$ e $a$. Assim a fórmula de Taylor fica:

$$f(x) = f(a) + (x-a)f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2}f''(a) + \frac{(x-a)^3}{3!}f'''(a) + \cdots + \frac{(x-a)^n}{n!}f^{(n)}(a) + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(x-a)^{n+1}$$

com $\xi$ estritamente entre $x$ e $a$.

### 3.1.1 Exemplo de aplicação

Suponhamos que queremos calcular $\sqrt{99}$ com um erro de menos de três casas decimais:

$$\sqrt{99} = \sqrt{100 - 1} = \sqrt{100\left(1 - \frac{1}{100}\right)} = 10\sqrt{1 - \frac{1}{100}}$$

Assim, fica evidenciado que pretendemos calcular a função

$$f(x) = 10\sqrt{1 + x}$$

no ponto $x = -\frac{1}{100}$. Por outro lado, $-\frac{1}{100}$ é um número bastante pequeno, quase zero. Então usamos a fórmula de Taylor para $f$ em $a = 0$:

$$f(x) = 10\sqrt{1 + x}; \qquad f(0) = 10\sqrt{1 + 0} = 10$$

$$f'(x) = \left(10\sqrt{1 + x}\right)' = 10\frac{1}{2}(1 + x)^{-\frac{1}{2}} = 5(1 + x)^{-\frac{1}{2}}; \qquad f'(0) = 5$$

$$f''(x) = \left(5(1 + x)^{-\frac{1}{2}}\right)' = -\frac{5}{2}(1 + x)^{-\frac{3}{2}} = -\frac{5}{2}\frac{1}{(1 + x)^{\frac{3}{2}}}; \qquad f''(\xi) = -\frac{5}{2}\frac{1}{(1 + \xi)^{\frac{3}{2}}}$$

Então, aplicando a fórmula de Taylor de grau 2 com resto de Lagrange de grau dois tem-se:

$$10\sqrt{1 + x} = 10 + 5x + \frac{-\frac{5}{2}\frac{1}{(1+\xi)^{\frac{3}{2}}}}{2!}x^2 = 10 + 5x - \frac{5}{4}\frac{1}{(1 + \xi)^{\frac{3}{2}}}x^2$$

donde,

$$\sqrt{99} = 10\sqrt{1 - \frac{1}{100}} \approx \left(10 + 5x\right)\Big|_{x=-\frac{1}{100}} = 10 - \frac{5}{100} = 10 - \frac{1}{20} = \frac{199}{20} = 9.95$$

com erro:

$$\left|10\sqrt{1 + x} - (10 + 5x)\right| \quad \Big|_{x=-\frac{1}{100}} = \left| - \frac{5}{4}\frac{1}{(1 + \xi)^{\frac{3}{2}}}x^2\right| \quad \Big|_{x=-\frac{1}{100}} \left(0 < \xi < -\frac{1}{100}\right)$$

$$\leq \frac{5}{4}\frac{1}{(1 - \frac{1}{100})^{\frac{3}{2}}}(-\frac{1}{100})^2 = \frac{5}{4}\left(\frac{100}{99}\right)^{\frac{3}{2}} 10^{-4} \leq \frac{5}{4} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = .00025$$

que é, portanto, um erro inferior a $10^{-3}$, como pretendíamos.

## 3.2 Fórmula de Taylor com resto de Peano

Se $f$ for, mais uma vez, $n + 1$ vezes diferenciável em $a$ tem-se a seguinte fórmula para o resto (conhecida por fórmula do resto de Peano):

$$r_n(x) = \frac{(x - a)^{n+1}}{(n + 1)!}\left(f^{(n+1)}(a) + \alpha_n(x)\right)$$

onde $\alpha_n(x)$ é uma função de $x$ tal que:

$$\lim_{x \mapsto a} \alpha_n(x) = 0$$

### 3.2.1 Aplicação: Estudo de Extremos

Se $f$ é uma função diferenciável, os pontos de estacionaridade, isto é, os pontos $x$ aonde $f'(x) = 0$, são um ponto de partida para o estudo dos extremos de $f$

Suponhamos que $f$ é duas vezes diferenciável em $a$ e $f'(a) = 0$. Então a fórmula de Taylor aplicada a $f$ no ponto $a$ com resto de Peano é:

$$f(x) = f(a) + (x-a)f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2}\Big(f''(a) + \alpha_1(x)\Big) = f(a) + \frac{(x-a)^2}{2}\Big(f''(a) + \alpha_1(x)\Big)$$

já que $f'(a) = 0$ e portanto

$$f(x) - f(a) = \frac{(x-a)^2}{2}\Big(f''(a) + \alpha_1(x)\Big)$$

Se f tem um extremo local em $a$, então $f(x) - f(a)$ tem sinal constante nalguma vizinhança de $a$ porque ou $f(x) \geq f(a)$ (mínimo local) ou $f(x) \leq f(a)$ (máximo local), nalguma vizinhança de $a$. Pretendemos, então, conhecer o sinal de $f(x)-f(a)$, numa vizinhança de $a$. Isso vai-nos ser facilitado pelo conhecimento do sinal de $f''(a)$, dada a igualdade acima. De facto, já que $(x-a)^2 \geq 0$ então o sinal de $f(x) - f(a)$ é dado por $f''(a) + \alpha_1(x)$. Suponhamos então que $f''(a) \neq 0$. Como $\lim_{x \mapsto a} \alpha_1(x) = 0$ então por definição de limite, para todo o $\epsilon > 0$ existe $\delta > 0$ tal que, sempre que $x \in V_\delta(a)$ $|\alpha_1(x) - 0| < \epsilon$, ou seja $|\alpha_1(x)| < \epsilon$. Com $\epsilon = |f''(a)|(> 0)$, existirá então $\delta > 0$ tal que para todo o $x \in f''(a)_\delta(a)$, $|\alpha_1(x)| < |f''(a)|$ e portanto o sinal de $f''(a) + \alpha_1(x)$ é o sinal de $f''(a)$, nessa vizinhança. Então se $f''(a) > 0$ o sinal de $f(x) - f(a)$ é positivo e portanto ocorre um mínimo em $x = a$; se $f''(a) < 0$ o sinal de $f(x) - f(a)$ é negativo e portanto ocorre um máximo em $x = a$.

Se $f''(a) = 0$ usamos a fórmula de Taylor de ordem dois:

$$f(x) = f(a) + (x-a)f'(a) + \frac{(x-a)^2}{2}f''(a) + \frac{(x-a)^3}{3!}\Big(f'''(a) + \alpha_2(x)\Big) = f(a) + \frac{(x-a)^3}{3!}\Big(f'''(a) + \alpha_2(x)\Big)$$

Mais uma vez, queremos saber o sinal de $f(x) - f(a)$ "junto" a $a$. Comecemos por supor que $f'''(a) \neq 0$. Tem-se:

$$f(x) - f(a) = \frac{(x-a)^3}{3!}\Big(f'''(a) + \alpha_2(x)\Big)$$

mas como $(x-a)^3$ muda de sinal quando $x$ "passa" por $a$, então $f$ não tem extremo em $a$. Se $f'''(a) = 0$, então utilizar-se-ia a fórmula de Taylor de ordem 3 e assim por diante. Enunciamos então o seguinte:

**Teorema 3.1** *Seja $f$ $n$ vezes diferenciável em $a$ (com $n \geq 2$) e tal que*

$$0 = f'(a) = f''(a) = \cdots = f^{(n-1)}(a) \quad \text{e} \quad f^{(n)}(a) \neq 0$$

*(i) Se $n$ é par, $f(a)$ é máximo local se $f^{(n)}(a) < 0$ e é mínimo local se $f^{(n)}(a) > 0$*

*(ii) Se $n$ é ímpar, $f$ não tem extremo local em $a$*

Dem. A fórmula de Taylor de ordem $n-1$ para $f$ em $a$ com resto de Peano é:

$$f(x) = f(a) + \frac{(x-a)^n}{n!}\Big(f^{(n)}(a) + \alpha_{n-1}(x)\Big)$$

Se $n$ é par, então $(x-a)^n \geq 0$ e argumentando como acima concluímos que ocorre máximo em $a$ se $f^{(n)}(a) < 0$ e mínimo se $f^{(n)}(a) > 0$. Analogamente para $n$ ímpar. ■

Quanto à concavidade de uma função diferenciável num ponto $a$, a análise que se faz é analoga a que acabámos de fazer. Queremos agora é estudar o sinal da função $f(x) - g(x)$, $\Big($ onde $g(x) = \Big(f(a) + (x-a)f'(a)\Big)$. O facto de o sinal da função $f(x) - g(x)$ ser negativo, pelo menos numa vizinhança de $a$, diz-nos que a função $f$ está, nessa vizinhança, sempre abaixo da tangente no ponto $a$ (concavidade voltada para baixo (côncava); ver exemplo na figura 1) e no caso de ser positivo, que a função está acima da tangente no ponto $a$ (concavidade voltada para cima; convexa). Temos então:

**Teorema 3.2** *Seja $f$ $n$ vezes diferenciável em $a$ (com $n \geq 2$) e tal que*

$$0 = f''(a) = f'''(a) = \cdots = f^{(n-1)}(a) \quad \text{e} \quad f^{(n)}(a) \neq 0$$

*(i) Se $n$ é par, $f$ é côncava em $a$ se $f^{(n)}(a) < 0$ e é convexa em $a$ se $f^{(n)}(a) > 0$*

*(ii) Se $n$ é ímpar, $f$ tem ponto de inflexão em $a$*

Dem. Omitida. ■

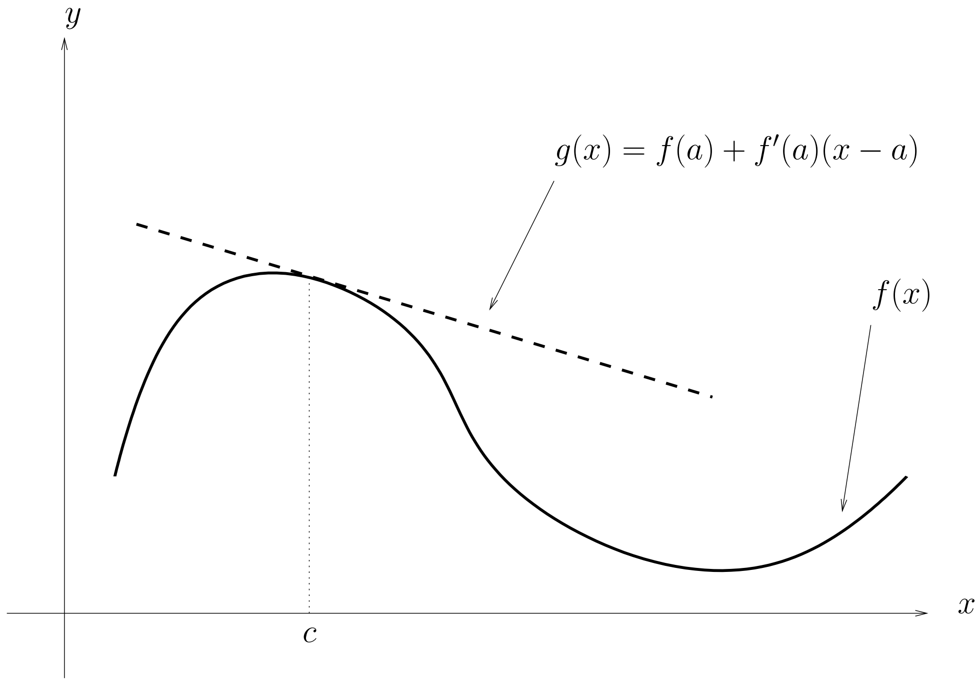


Figure 1: $f$ diferenciável em $c$ e a tangente ao gráfico de $f$ em $a$.

# 4 Outra maneira de definir derivada

Dada $f$ diferenciável num ponto $a$, podemos escrever a sua fórmula de Taylor de ordem 1 relativamente a esse ponto $a$:

$$f(x) = f(a) + f'(a) \cdot (x-a) + r_1(x) \qquad \text{com } \lim_{x \mapsto a} \frac{r_1(x)}{x-a} = 0$$

Suponhamos agora que, dada uma função $f$ definida numa vizinhança de $a$, existe um número real $\gamma$ e uma função $r_1(x)$ tal que

$$f(x) = f(a) + \gamma \cdot (x-a) + r_1(x) \qquad \text{com } \lim_{x \mapsto a} \frac{r_1(x)}{x-a} = 0$$

Então

$$f(x) - f(a) = \gamma \cdot (x-a) + r_1(x) \Rightarrow \frac{f(x)-f(a)}{x-a} = \frac{\gamma \cdot (x-a) + r_1(x)}{x-a} = \gamma + \frac{r_1(x)}{x-a}$$

e portanto

$$\lim_{x \mapsto a} \frac{f(x)-f(a)}{x-a} = \lim_{x \mapsto a} \Big(\gamma + \frac{r_1(x)}{x-a}\Big) = \gamma + \lim_{x \mapsto a} \frac{r_1(x)}{x-a} = \gamma + 0 = \gamma$$

ou seja $f$ é diferenciável em $a$ com $f'(a) = \gamma$.

Provámos então que $f$ é diferenciável em $a$ é equivalente a dizer que existe um número real, chamemos-lhe $\gamma$, e uma função $r_1(x)$, tal que

$$f(x) = f(a) + \gamma \cdot (x-a) + r_1(x) \qquad \text{com } \lim_{x \mapsto a} \frac{r_1(x)}{x-a} = 0$$

Reescrevendo esta expressão na forma

$$f(x) - f(a) = \gamma \cdot (x-a) + r_1(x) \qquad \text{com } \lim_{x \mapsto a} \frac{r_1(x)}{x-a} = 0$$

podemos dizer desta função que $f(x) - f(a)$ é aproximadamente linear em $x - a$:

$$f(x) - f(a) \approx \gamma \cdot (x-a)$$

e que essa aproximação é tanto melhor quanto mais próximo de $a$ $x$ estiver - já que $r_1(x)$ tende para zero mais rapidamente que $x-a$ quando $x$ tende para $a$. Doutra forma ainda, a "distância" de $f(x)$ a $f(a)$ é, aproximadamente, uma função linear da "distância" de $x$ a $a$.

Seguidamente, neste curso, estudaremos funções de várias variáveis, em particular funções reais de várias variáveis reais, por exemplo,

$$f(x,y) = x^2 + y^2 \quad \text{para todo o } x \text{ e } y \text{ reais}$$

O que significará "diferenciável num ponto $(a,b)$" para uma função deste tipo? Note-se que **NÃO** vai ser possível calcular

$$\lim_{(x,y)\mapsto(a,b)} \frac{f(x,y)-f(a,b)}{(x,y)-(a,b)}$$

pois desde logo **NÃO** está definida um operação de divisão nestes conjuntos. Como vimos atrás, havia já em $\mathbb{R}$ uma outra maneira (equivalente) de definir derivada num ponto. Seria aqui dizer que a "distância" de $f(x,y)$ a $f(a,b)$ é, aproximadamente, uma função linear da "distância" de $(x,y)$ a $(a,b)$. É, de facto, esta a maneira que usaremos para definir derivada num ponto para estas novas funções, como veremos adiante.