Teoremi sulle funzioni derivabili

Iniziamo con la definizione di punto di massimo o minimo relativo di una funzione:
Definizione
a) $x_0 \in D_f$ è un punto di massimo relativo se esiste un intorno I_{x_0} tale che :

$$f(x_0) \geq f(x) \qquad \forall x \in I_{x_0}$$

b) $x_0 \in D_f$ è un punto di minimo relativo se esiste un intorno I_{x_0} tale che :

$$f(x_0) \leq f(x) \qquad \forall x \in I_{x_0}$$

Diamo ora la definizione di massimo e minimo assoluto:
Definizione
a) $x_0 \in D_f$ è il punto di massimo assoluto se :

$$f(x_0) \geq f(x) \qquad \forall x \in D_f$$

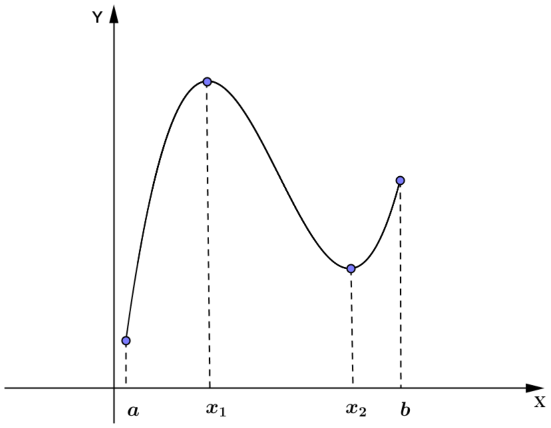
e $f(x_o) = M$ è il massimo assoluto della funzione;

b) $x_0 \in D_f$ è il punto di minimo assoluto se:

$$f(x_0) \leq f(x) \qquad \forall x \in D_f$$

e $f(x_o) = m$ è il minimo assoluto della funzione

OSSERVAZIONE : un punto di massimo (minimo) assoluto è anche un punto di massimo (minimo) relativo ma il viceversa non è vero.

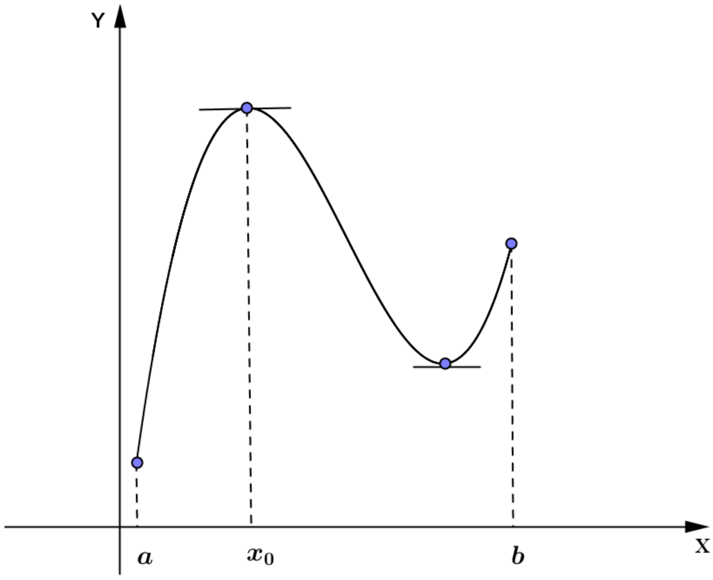


a e x_2 sono punti di minimo relativo ; a è punto di minimo assoluto;
x_1 e b sono punti di massimo relativo e x_1 è punto di massimo assoluto.

Per studiare il grafico di una funzione è fondamentale la ricerca di punti di massimo (minimo) relativi. Per capire come possano essere individuati vediamo alcuni teoremi riguardanti le funzioni derivabili. Partiremo da un teorema riguardante i massimi (minimi) relativi **interni** al dominio (per es. x_1 e x_2 nel grafico dell'esempio precedente) in cui la funzione è derivabile e poi dimostreremo tre teoremi (Rolle, Cauchy, Lagrange) che ci permetteranno di dimostrare il legame tra l'"andamento" di una funzione (funzione crescente, decrescente) e il **segno della sua derivata**.

Teorema di Fermat
Punti di massimo (minimo) relativi interni al dominio

Sia $f:[a,b]\rightarrow\Re$ continua in $[a,b]$ e derivabile in (a,b).
Se x_0 è un punto di massimo (minimo) relativo interno al dominio $\Rightarrow f'(x_0)=0$ (cioè la tangente al grafico è parallela all'asse x)



Dimostrazione

Supponiamo che x_0 sia un punto di massimo relativo interno al dominio (vedi figura).
Allora $\exists \quad I_{x_o} : f(x_0)\geq f(x) \quad \forall x\in I_{x_0}$ e quindi $f(x)-f(x_0)\leq 0 \quad \forall x\in I_{x_0}$

Calcoliamo $f'(x_0)$:

$$\lim_{x\to x_0^+}\frac{f(x)-f(x_0)}{x-x_0}\leq 0 \text{ perché } f(x)-f(x_0)\leq 0 \text{ e } x-x_0>0$$

mentre $\lim_{x\to x_0^-}\frac{f(x)-f(x_0)}{x-x_0}\geq 0$ perché $f(x)-f(x_0)\leq 0$ e $x-x_0<0$

Ma se $f(x)$ è derivabile in x_0 i due limiti devono coincidere e quindi l'unica possibilità è che siano entrambi uguali a 0 $\Rightarrow f'(x_0)=0$.

Osservazione: è importante che se x_0 è un punto di massimo o minimo relativo ma non è interno al dominio (per es. a e b nella figura) non è detto che in x_0 la derivata sia nulla (vedi figura).

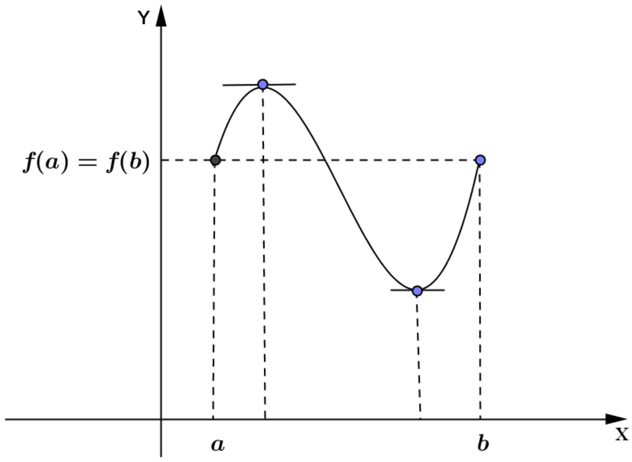
NOTA : il viceversa del teorema non è vero perché se in x_0 si ha $f'(x_0)=0$ significa che la **tangente al grafico è orizzontale** e x_0 potrebbe anche essere un "punto di flesso" a tangente orizzontale cioè un punto in cui il grafico cambia concavità come vedremo in seguito.

Teorema di Rolle (*matematico francese*)

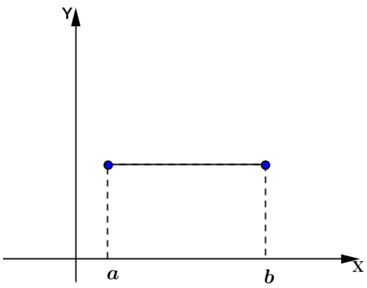
Sia $f:[a,b]\to\Re$ continua in $[a,b]$ e derivabile in (a,b) e se

$$f(a)=f(b)\Rightarrow \exists x_0\in(a,b): f'(x_0)=0$$

cioè esiste **almeno** un punto $x_0\in(a,b): f'(x_0)=0$.

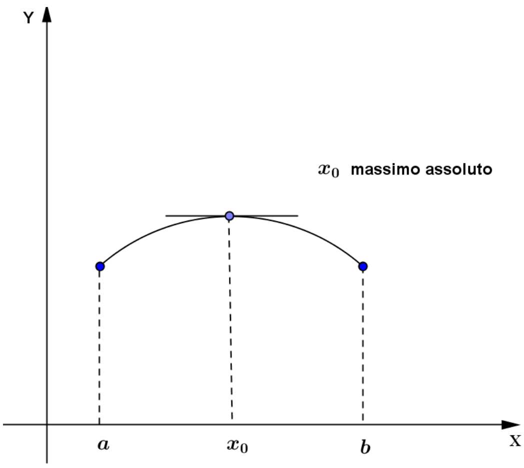


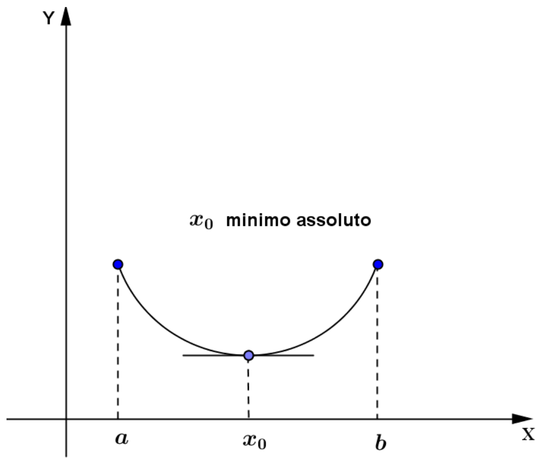
Dimostrazione



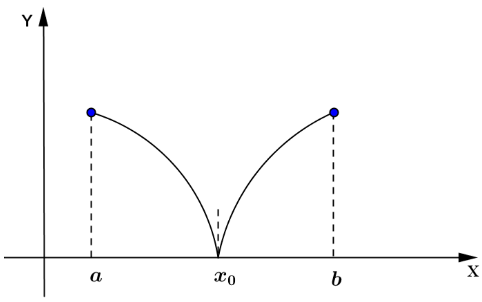
Se $f(x)$ è costante allora $\forall x\in(a,b)\quad f'(x)=0$.

Se $f(x)$ non è costante, per il teorema di Weierstrass ha massimo e minimo assoluti. Poiché però $f(a)=f(b)$ il massimo e il minimo assoluti non possono essere assunti entrambi negli estremi dell'intervallo e quindi **almeno uno deve essere interno** al dominio $\Rightarrow$(per il teorema precedente) $\exists x_0\in(a,b): f'(x_0)=0$





NOTA : se la funzione non fosse derivabile in (a,b) il teorema non sarebbe vero.
Consideriamo per esempio il caso in figura: $f(a)=f(b)$ ma non c'è nessun punto x_0 con tangente al grafico parallela all'asse x (cioè con derivata nulla)



In x_0 $f(x)$ non è derivabile.

Esempi

1) Considera $f(x)=\sqrt{4-x^2}$

- Verifica le ipotesi del teorema di Rolle in $I=[-2,2]$?

$f(x)$ ha come dominio $4-x^2\geq 0 \Rightarrow -2\leq x\leq 2 \Rightarrow f(x)$ è continua in $[-2,2]$.

Calcoliamo $$f'(x)=\frac{1}{2\sqrt{4-x^2}}\cdot(-2x)=\frac{-x}{\sqrt{4-x^2}}$$

Quindi f(x) non è derivabile in $x=\pm 2$ (punti a tangente verticale) ma nelle ipotesi del teorema non si richiede la derivabilità negli estremi dell'intervallo.

Verifichiamo infine se $f(a)=f(b)$ cioè $f(-2)=f(2)$

$f(-2)=0$ $\quad f(2)=0$ e quindi anche questa ipotesi è verificata.

Quindi $f(x)$ verifica tutte le ipotesi del teorema di Rolle in $[-2,2]$

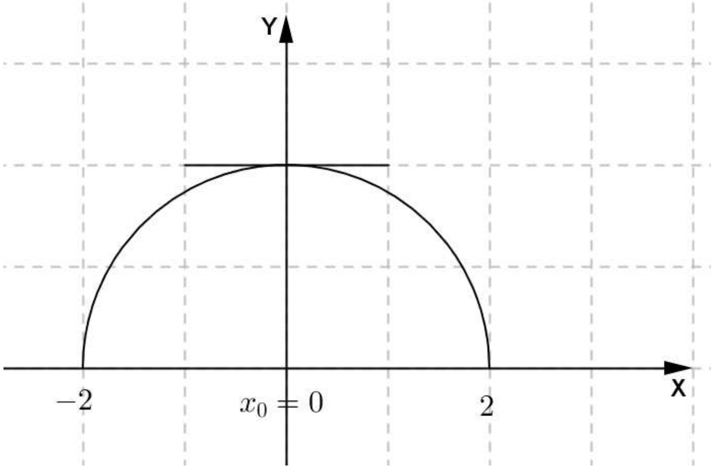
- Qual è (o quali sono) il punto $x_0 : f'(x_0)=0$?

Basta porre $f'(x)=0$ e risolvere l'equazione.

Abbiamo $$\frac{-x}{\sqrt{4-x^2}}=0 \Rightarrow x=0$$

Quindi $x_0=0$

Del resto disegnando il grafico di $f(x)=\sqrt{4-x^2}$ (elevando al quadrato $\Rightarrow x^2+y^2=4 \Rightarrow$ semicirconferenza di centro $(0,0)$ e raggio 2) si osserva che in $x_0=0$ si ha la tangente orizzontale.



2) Considera $f(x)=\left|2x-x^2\right|$ nell'intervallo $I=[1-\sqrt{2},1]$.

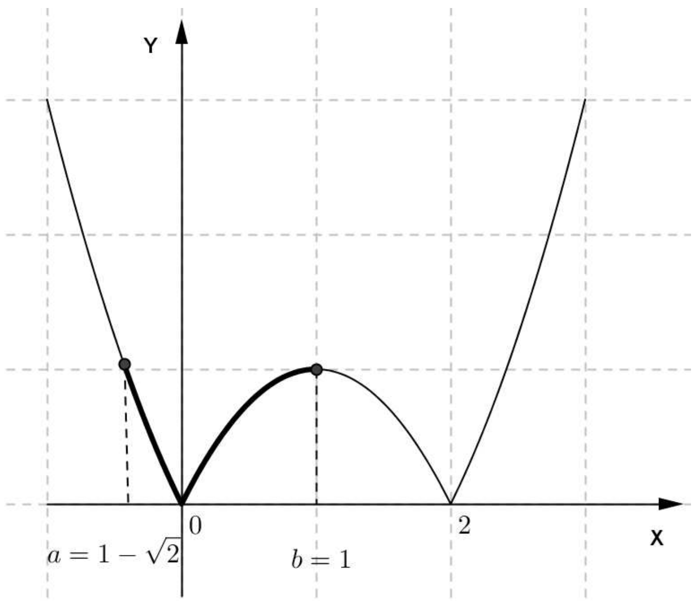
La funzione verifica le ipotesi del teorema di Rolle?

$$f(x)=\begin{cases} 2x-x^2 & \textit{quando} \quad 2x-x^2 \geq 0 \Leftrightarrow \quad 0 \leq x \leq 2 \\ -(2x-x^2) & \textit{quando} \quad 2x-x^2 \leq 0 \Leftrightarrow x \leq 0 \cup x \geq 2 \end{cases}$$

Quindi

$$f'(x)=\begin{cases} 2-2x & 0<x<2 \\ -(2-2x) & x<0 \cup x>2 \end{cases}$$

Disegnando il grafico abbiamo:



Consideriamo l'intervallo assegnato $I=[1-\sqrt{2},1]$: in questo intervallo la funzione è continua e $f(a)=f(b)$ (si verifica facilmente) ma in $x=0$ (interno a I) non è derivabile perché

$$\lim_{x\to 0^-} f'(x)=-2 \text{ mentre } \lim_{x\to 0^+} f'(x)=2$$

Quindi le ipotesi del teorema di Rolle non sono verificate ed infatti osservando il grafico nessun punto interno a I ha derivata nulla.

3) Per quali valori di a e b la funzione

$$f(x)=\begin{cases} ax^2+1 & -1\le x\le 0 \\ \frac{1}{2}x^2+b & 0<x\le\sqrt{2}\end{cases}$$

verifica le ipotesi del teorema di Rolle nell'intervallo $I=\left[-1;\sqrt{2}\right]$? Qual è il valore x_0 per cui $f'(x_0)=0$? Disegna il grafico di f(x).

Svolgimento
Perché la funzione sia continua anche in x = 0 occorre che il limite sinistro e destro di f(x) in x=0 siano uguali:

$$\lim_{x\to 0^-} f(x)=\lim_{x\to 0^-} ax^2+1=1$$

$$\lim_{x\to 0^+} f(x)=\lim_{x\to 0^+} \frac{1}{2}x^2+b=b$$

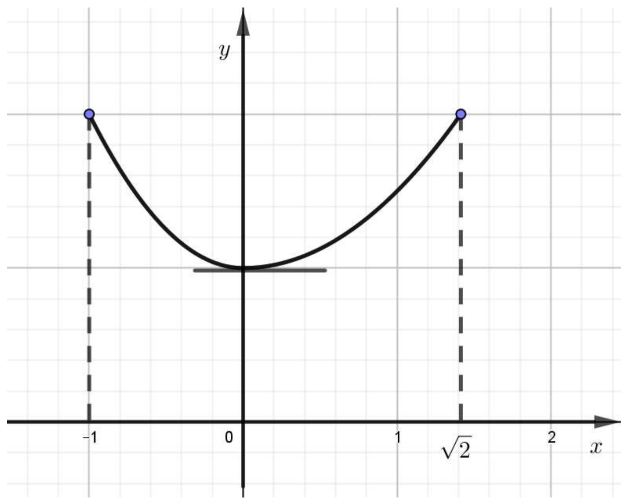
Quindi si dovrà avere $b=1$.
La derivabilità è verificata anche per $x = 0$ poiché essendo

$$f'(x)=\begin{cases} 2ax & -1\le x<0 \\ x & 0<x\le\sqrt{2}\end{cases}$$

abbiamo che $\lim_{x\to 0^-} y'=\lim_{x\to 0^+} y'=0$.
Quindi, perché siano verificate tutte le ipotesi del teorema di Rolle, basta che $f(-1)=f\left(\sqrt{2}\right)$.
Abbiamo:

$$f(-1)=a+1$$
$$f\left(\sqrt{2}\right)=2$$

e quindi dovrà essere $a+1=2\Rightarrow a=1$.
In conclusione abbiamo $a=1$, $b=1$ e il grafico risulta quello in figura.
Il punto x_0 in cui si annulla la derivata è $x_0=0$.



ESERCIZI
TEOREMA DI ROLLE

1) Considera la funzione $f(x) = |2 - x|$
Si può applicare il teorema di Rolle in $I = [0,4]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[no, perché …]

2) Considera $f(x) = 1 + \sqrt{1 - x^2}$. Si può applicare il teorema di Rolle in $I = [-1,1]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[si; $x_0 = 0$]

3) Considera $f(x) = \left|\frac{1-x}{x}\right|$. Si può applicare il teorema di Rolle in $I = \left[\frac{3}{4}, \frac{3}{2}\right]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[no, perché …]

4) Considera $f(x) = |arctgx|$. Si può applicare il teorema di Rolle in $I = [-1,1]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[no, perché …]

5) Considera $f(x) = e^{-x^2}$. Si può applicare il teorema di Rolle in $I = [-1,1]$?

[si; $x_0 = 0$]

6) Considera $f(x) = |x^3|$. Si può applicare il teorema di Rolle in $I = [-1,1]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[si; $x_0 = 0$]

Teorema di Cauchy (*matematico francese*)

Siano $f:[a,b]\to\Re$ e $g:[a,b]\to\Re$ due funzioni continue in $[a,b]$ e derivabili in (a,b) e inoltre sia $g'(x)\neq 0 \quad \forall x\in(a,b)$

$$\Rightarrow \exists \quad x_0\in(a,b):\quad \frac{f'(x_0)}{g'(x_0)}=\frac{f(b)-f(a)}{g(b)-g(a)}$$

Dimostrazione

Osserviamo innanzitutto che $g(a)\neq g(b)$ perché se fosse $g(a)=g(b)$ per il teorema di Rolle

$\exists \quad x_0\in(a,b): g'(x_0)=0$ e questo è contrario all'ipotesi che $g'(x)\neq 0 \quad \forall x\in(a,b)$.

Consideriamo la funzione $F(x)$ così definita:

$$F(x)=\left(g(b)-g(a)\right)\cdot f(x)-\left(f(b)-f(a)\right)\cdot g(x)$$

Poiché $F(x)$ è continua in $[a,b]$ e derivabile in (a,b) e, come si può verificare facilmente,

$$F(a)=F(b)$$

per il teorema di Rolle $\exists \quad x_0\in(a,b): F'(x_0)=0$

Ma $F'(x)=\left(g(b)-g(a)\right)\cdot f'(x)-\left(f(b)-f(a)\right)\cdot g'(x)$

e quindi $\quad F'(x_0)=\left(g(b)-g(a)\right)\cdot f'(x_0)-\left(f(b)-f(a)\right)\cdot g'(x_0)=0$ e quindi $\exists \quad x_0\in(a,b):$

$$\frac{f'(x_0)}{g'(x_0)}=\frac{f(b)-f(a)}{g(b)-g(a)}$$

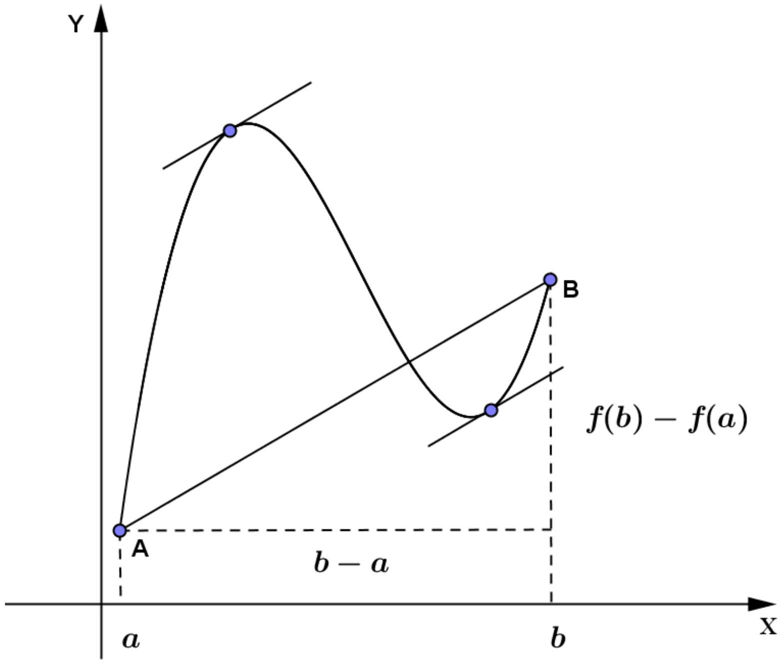
Dal teorema di Cauchy segue subito il seguente teorema di Lagrange (matematico torinese).

Teorema di Lagrange

Se $f:[a,b] \to \Re$ è continua in $[a,b]$ e derivabile in (a,b)

$$\Rightarrow \exists \quad x_0 \in (a,b): \quad f'(x_0) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$$

Interpretazione geometrica: poiché $\frac{f(b)-f(a)}{b-a}$ è l'inclinazione della retta passante per gli estremi del grafico, il teorema afferma che esiste almeno un punto $P(x_0, f(x_0))$ in cui la tangente al grafico è parallela alla retta passante per gli estremi del grafico.



Dimostrazione

Basta considerare come seconda funzione $g(x) = x$ (continua, derivabile e con $g'(x) \neq 0$) ed applicare il teorema di Cauchy.

Infatti poiché $g'(x) = 1 \quad \forall x \in (a,b)$ e $g(b) = b, \quad g(a) = a$ avremo che

$$\exists \quad x_0 \in (a,b): \frac{f'(x_0)}{1} = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$$

cioè quello che volevamo dimostrare.

Esempi

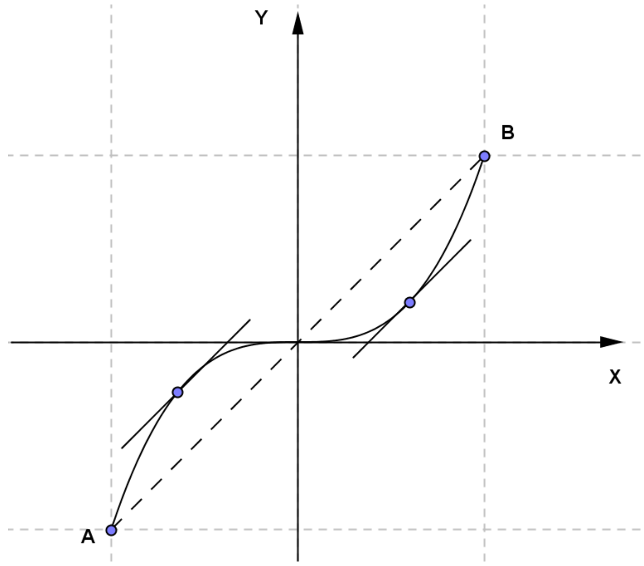
1) Consideriamo $f(x)=x^3$ nell'intervallo $I=[-1,1]$.

- Verifica le ipotesi del teorema di Lagrange?
  Poiché $f(x)$ è continua e derivabile in $\Re$ lo è sicuramente anche in *I* e quindi verifica le ipotesi del teorema di Lagrange.
- Determina il punto x_0 (o i punti) : $f'(x_0)=\dfrac{f(b)-f(a)}{b-a}$

  Nel nostro caso $f(-1)=-1$ $f(1)=1$ e quindi, essendo $f'(x)=3x^2$ devo risolvere:

$$3x^2=\frac{1-(-1)}{2}$$
$$3x^2=1\Rightarrow x_{1,2}=\pm\frac{1}{\sqrt{3}}$$

I valori sono interni all'intervallo *I* e quindi entrambi accettabili.
Graficamente infatti si verifica che esistono due punti del grafico in cui la tangente è parallela alla retta per $A(-1,-1)$ e $B(1,1)$



2) Consideriamo $f(x)=\left|1-x^2\right|$ in $I=[0,2]$. Si può applicare il teorema di Lagrange?

Poiché $f(x)=\begin{cases}1-x^2 & -1\le x\le 1\\ -(1-x^2) & x\le -1 \ \vee\ x\ge 1\end{cases}$

$$f'(x)=\begin{cases}-2x & -1<x<1\\ 2x & x<-1 \ \vee\ x>1\end{cases}$$

Poiché $\lim_{x\to 1^-}f'(x)=-2$ e $\lim_{x\to 1^+}f'(x)=2$ si ha che f(x) non è derivabile in $x=1$ (interno a I) e quindi il teorema di Lagrange non si può applicare.

3) La funzione

$$f(x)=\begin{cases}1-x^2 & -1\le x\le 0\\ 1+x^2 & 0<x\le 1\end{cases}$$

verifica le ipotesi di Lagrange nell'intervallo $I=[-1;1]$? Se la risposta è affermativa qual è il punto x_0 (o i punti) previsto dal teorema? Traccia il grafico di f(x).

Svolgimento
La funzione è continua anche in $x=0$ poiché

$$\lim_{x\to 0^-} f(x)=\lim_{x\to 0^-} 1-x^2 \ =1$$
$$\lim_{x\to 0^+} f(x)=\lim_{x\to 0^+} 1+x^2 \ =1$$

Per la derivabilità poiché abbiamo:

$$f^{'}(x)=\begin{cases}-2x & -1\le x<0\\ 2x & 0<x\le 1\end{cases}$$

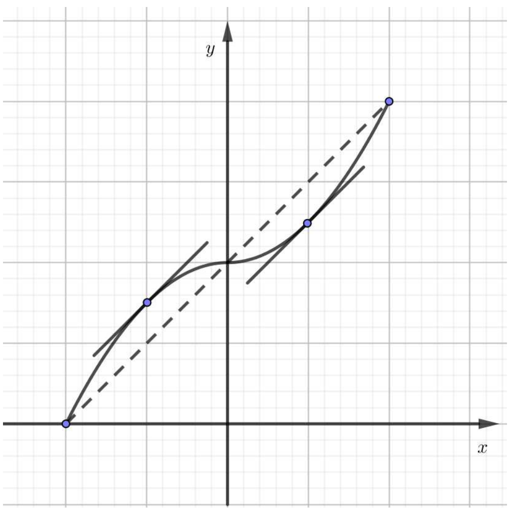
la funzione è derivabile anche per x = 0 poiché limite sinistro e destro di y' per $x\to 0$ sono uguali (entrambi zero).
Sono quindi verificate le ipotesi del teorema di Lagrange.
Calcoliamo

$$\frac{f(b)-f(a)}{b-a}=\frac{f(1)-f(-1)}{2}=\frac{2}{2}=1$$

Quindi per determinare x_0 tale che $y'(x_0)=\dfrac{f(b)-f(a)}{b-a}$ poniamo:

$$-2x=1\to x=-\frac{1}{2}$$
$$2x=1\to x=\frac{1}{2}$$

Abbiamo quindi due valori di x_0 (vedi grafico).



ESERCIZI
TEOREMA DI LAGRANGE

1) Considera $f(x) = x^3 - 8$. Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [0,2]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[si; $x_0 = +\frac{2}{\sqrt{3}}$]

2) Considera $f(x) = \begin{cases} \frac{3 - x^2}{2} & 0 \le x \le 1 \\ \frac{1}{x} & 1 \le x \le 2 \end{cases}$

Si può applicare il teorema di Lagrange?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[si; $x_1 = \frac{1}{2}, \quad x_2 = \sqrt{2}$]

3) Considera $f(x) = \begin{cases} e^x & x < 0 \\ x + 1 & x \ge 0 \end{cases}$

Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [-1,1]$?

[si; $x_0 = \ln\left(1 - \frac{1}{2e}\right)$]

4) Considera $f(x) = \begin{cases} 1 - x - x^2 & -1 \le x \le 0 \\ e^{-x} & 0 \le x \le 1 \end{cases}$

Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [-1,1]$?

[si; $x_0 = -\frac{1+e}{4e}$]

5) Considera

$$f(x) = \begin{cases} x^2 & x \le 0 \\ \frac{1}{2}x^2 & x > 0 \end{cases}$$

Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [-1,2]$?

[si; $x_0 = \frac{1}{3}$]

6) Considera $f(x) = 2x^3 - 3x^2$
Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [-1,2]$?

[si; $x_{1,2} = \dfrac{1 \pm \sqrt{3}}{2}$]

7) Considera

$$f(x) = \begin{cases} x^2 & 0 \le x \le 1 \\ -x^2 + 4x - 2 & 1 < x \le 2 \end{cases}$$

Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [0,2]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[si; $x_1 = \dfrac{1}{2}$; $x_2 = \dfrac{3}{2}$]

8) Considera $f(x) = \dfrac{2x}{x+1}$. Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [1,3]$?
Disegna il grafico di $f(x)$.

[si; $x_0 = 2\sqrt{2} - 1$]

9) Considera $f(x) = \sqrt{x}$. Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [4,9]$?

[si; $x_0 = \dfrac{25}{4}$]

10) Considera $f(x) = \ln x$. Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [1, e]$?

[si; $x_0 = e - 1$]

11) Considera $f(x) = x^2 + |x|$. Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [-1,2]$?

[no, perché …]

12) Considera

$$f(x) = \begin{cases} x - 1 & 0 \le x < 1 \\ \ln x & x \ge 1 \end{cases}$$

Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [0,2]$?

[si; $x_0 = \dfrac{2}{\ln 2 + 1}$]

13) Considera

$$f(x) = \begin{cases} 2 - x^2 & 0 \le x \le 1 \\ \dfrac{2 - x}{x} & 1 < x \le 2 \end{cases}$$

Si può applicare il teorema di Lagrange in $I = [0,2]$? [si; $x_1 = \dfrac{1}{2}$; $x_2 = \sqrt{2}$]

Teorema di De l'Hospital

(senza dimostrazione)

Se $\lim_{\substack{x\to x_0 \\ (x\to\infty)}} \frac{f(x)}{g(x)}$ si presenta in forma indeterminata $\frac{0}{0}, \frac{\infty}{\infty}$ e se esiste $\lim_{\substack{x\to x_0 \\ (x\to\infty)}} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ (finito o infinito)

$\Rightarrow \quad \lim_{\substack{x\to x_0 \\ (x\to\infty)}} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{\substack{x\to x_0 \\ (x\to\infty)}} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ (la dimostrazione si basa sul teorema di Cauchy)

NOTA : se $\lim_{\substack{x\to x_0 \\ (x\to\infty)}} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ si presenta ancora in forma indeterminata possiamo cercare di calcolare $\lim_{\substack{x\to x_0 \\ (x\to\infty)}} \frac{f''(x)}{g''(x)}$ eccetera…

Esempi

1) $$\lim_{x\to 0} \frac{senx}{x} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x\to 0} \frac{\cos x}{1} = 1$$

2) $$\lim_{x\to 0} \frac{e^x - 1}{x} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x\to 0} \frac{e^x}{1} = 1$$

3) $$\lim_{x\to +\infty} \frac{\ln x}{x^2} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x\to +\infty} \frac{\frac{1}{x}}{2x} = \lim_{x\to +\infty} \frac{1}{2x^2} = 0$$

In generale se $\alpha > 0$: $\lim_{x\to +\infty} \frac{\ln x}{x^\alpha} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x\to +\infty} \frac{\frac{1}{x}}{\alpha \cdot x^{\alpha-1}} = 0$

Si dice che la funzione $y = \ln x$ **è un "infinito" di ordine inferiore rispetto alla funzione** $y = x^\alpha$ $(\alpha > 0)$**, quando** $x \to +\infty$ **.**

4) $$\lim_{x\to +\infty} \frac{e^x}{x^2} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x\to +\infty} \frac{e^x}{2x} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x\to +\infty} \frac{e^x}{2} = +\infty$$

In generale se $\alpha > 0$: $\lim_{x\to +\infty} \frac{e^x}{x^\alpha} = ... = +\infty$

Si dice che la funzione $y = e^x$ **è un "infinito" di ordine superiore rispetto alla funzione** $y = x^\alpha$ $(\alpha > 0)$**, quando** $x \to +\infty$ **.**

5) $$\lim_{x \to +\infty} \frac{x + senx}{x + \cos x}$$

Derivando troviamo $\lim_{x \to +\infty} \frac{1 + \cos x}{1 - senx}$: questo limite non esiste e quindi non possiamo applicare il teorema di De l'Hospital.

In questo caso il limite dato può essere calcolato dividendo numeratore e denominatore per x:

$$\lim_{x \to +\infty} \frac{x + senx}{x + \cos x} = \frac{1 + \overset{\overset{0}{\uparrow}}{\left(\frac{senx}{x} \right)}}{1 + \underset{\underset{0}{\downarrow}}{\left(\frac{\cos x}{x} \right)}} = 1$$

6) Il teorema di De l'Hospital può essere utilizzato anche per determinare limiti che si presentano nella forma indeterminata $0 \cdot \infty$ del prodotto ma solo dopo aver scritto il prodotto come un quoziente "opportuno".

Per esempio:

$\lim_{x \to -\infty} x \cdot e^x$ si presenta in forma indeterminata $\infty \cdot 0$

Se scriviamo $\lim_{x \to -\infty} x \cdot e^x = \lim_{x \to -\infty} \frac{x}{e^{-x}} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x \to -\infty} \frac{1}{-e^{-x}} = 0$

Attenzione: se avessimo scritto $x \cdot e^x = \frac{e^x}{\frac{1}{x}}$ non saremmo riusciti a calcolare il limite con l'Hospital perché derivando la forma sarebbe rimasta indeterminata:

$\lim_{x \to -\infty} x \cdot e^x = \lim_{x \to -\infty} \frac{e^x}{\frac{1}{x}} \overset{\overset{H}{\downarrow}}{=} \lim_{x \to -\infty} \frac{e^x}{-\frac{1}{x^2}} = \frac{0}{0}$ che è ancora una forma indeterminata…

Occorre quindi fare attenzione a come si trasforma il prodotto.

ESERCIZI
TEOREMA DI DE L'HOSPITAL

Calcola i seguenti limiti

1) $\lim_{x\to+\infty}\frac{x^2}{\ln x}$ [$+\infty$]

2) $\lim_{x\to+\infty}\frac{x^3}{e^x}$ [0]

3) $\lim_{x\to0^+} x\cdot\ln x$ [0]

4) $\lim_{x\to+\infty}\frac{\ln x + x}{x^2}$ [0]

5) $\lim_{x\to-\infty} x^2\cdot e^x$ [0]

6) $\lim_{x\to\frac{\pi}{2}^-}\left(\frac{\pi}{2}-x\right)\cdot tgx$ [1]

7) $\lim_{x\to+\infty} x\cdot\left(arctgx-\frac{\pi}{2}\right)$ [-1]

8) $\lim_{x\to+\infty} x^2\cdot e^{-x}$ [0]

9) $\lim_{x\to0^+}\frac{\ln x}{\cot gx}$ [0]

10) $\lim_{x\to0^+} x^2\cdot\ln x$ [0]

11) $\lim_{x\to0}\frac{sen\,3x}{2x+tgx}$ [1]

12) $\lim_{x\to0}\frac{\ln(1+x)}{x}$ [1]

13) $\lim_{x\to0^+}\frac{\ln(1+x)}{x^2}$ [$+\infty$]

14) $\lim_{x\to0}\frac{e^{2x}-1}{x}$ [2]

Corollari del teorema di Lagrange

1) Se $f:[a,b]\to\Re$ è continua in $[a,b]$, derivabile in (a,b)
e $f'(x)=0\ \ \forall x\in(a,b)\ \Rightarrow\ f(x)=k$ cioè $f(x)$ è una funzione costante.

Dimostrazione

Sia $x\in(a,b)$: poiché $f(x)$ è continua anche in $[a,x]$ e derivabile in (a,x) , posso applicare il teorema di Lagrange a questo intervallo.

$$\Rightarrow \exists x_0\in(a,x):\ \ f'(x_0)=\frac{f(x)-f(a)}{x-a}$$

Ma $f'(x_0)=0$ e quindi $f(x)-f(a)=0\ \Rightarrow\ f(x)=f(a)$

Poiché questo accade comunque si scelga $x\in(a,b)$ si è dimostrato che $f(x)=k$ (cioè la funzione è costante).

2) Se $f:[a,b]\to\Re$ e $g:[a,b]\to\Re$ sono continue in $[a,b]$, derivabili in (a,b) e se

$$f'(x)=g'(x)\ \ \forall x\in(a,b)$$
$$\Downarrow$$
$$f(x)-g(x)=k\ \ \forall x\in[a,b]$$

Dimostrazione

Consideriamo $F(x)=f(x)-g(x)$

Poiché $F'(x)=f'(x)-g'(x)=0\ \ \forall x\in(a,b)$ applicando il primo corollario si ha $F(x)=k$ e quindi $f(x)-g(x)=k$ cioè le due funzioni differiscono per una costante.

3) Ma la conseguenza più interessante del teorema di Lagrange è rappresentata dal seguente teorema:

Teorema
Relazione tra il segno della derivata f'(x) e "andamento" della funzione

Data $f:[a,b]\rightarrow\Re$ continua in $[a,b]$ e derivabile in (a,b) abbiamo che:

- se $f'(x)>0 \quad \forall x\in(a,b) \quad \Rightarrow \quad f(x)$ è crescente in (a,b)
- se $f'(x)<0 \quad \forall x\in(a,b) \quad \Rightarrow \quad f(x)$ è decrescente in (a,b)

Dimostrazione

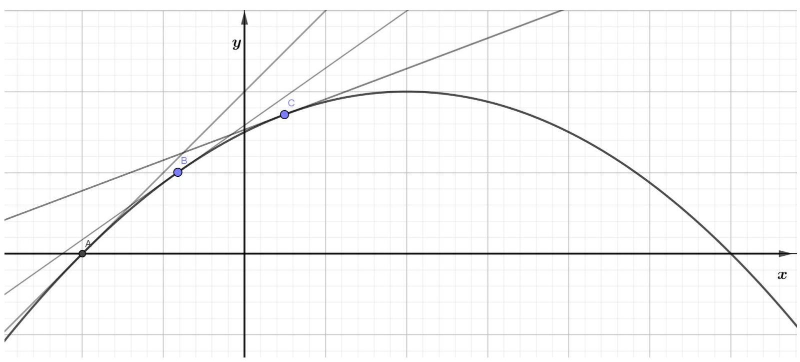
Consideriamo $x_1, x_2 \in [a,b]$ con $x_1 < x_2$.
Poiché $f(x)$ è continua in $[x_1,x_2]$ e derivabile in (x_1,x_2) applicando il teorema di Lagrange all'intervallo $[x_1,x_2]$

$$\exists x_0 \; con \qquad x_1 < x_0 < x_2 : \quad f'(x_0)=\frac{f(x_2)-f(x_1)}{x_2-x_1}$$

Ma $f'(x_0)>0$ per ipotesi e $x_2-x_1>0 \quad \Rightarrow \quad f(x_2)-f(x_1)>0 \quad \Rightarrow \quad f(x_2)>f(x_1)$

Quindi, poiché questo vale comunque scelga $x_1 < x_2$, abbiamo dimostrato che la funzione è crescente.
Analogamente si dimostra che se $f'(x)<0 \quad \forall x\in(a,b) \quad \Rightarrow \quad f(x)$ è decrescente.

Osservazione: infatti "geometricamente" si osserva che quando una funzione è crescente i coefficienti angolari delle tangenti sono positivi, mentre se è decrescente sono negativi (vedi figura).



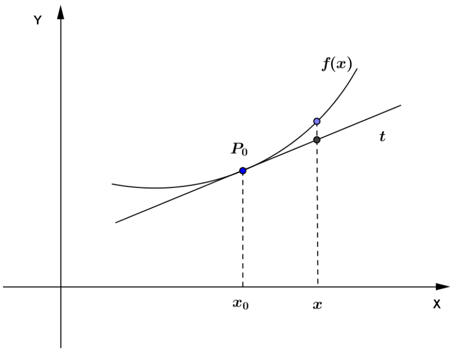
Nota
Osserviamo che se $f(x)$ è crescente in $[a,b] \Rightarrow f'(x)\geq 0$ poiché può esserci anche un flesso a tangente orizzontale.
Questo teorema è fondamentale per lo studio del grafico di una funzione poiché, come vedremo, ci permette di individuare i punti di massimo, minimo e flesso a tangente orizzontale.

CONCAVITA' E FLESSI

Nello studio di un grafico è importante determinare anche la "**concavità"** del grafico: i punti in cui c'è un cambio di concavità sono detti punti di flesso.

Definiamo cosa si intende per "**concavità verso l'alto**" o "**verso il basso**" del grafico di una funzione in x_0:

Definizione: diciamo che **in** x_0 **il grafico di** $f(x)$ **volge la concavità verso l'alto** quando esiste un intorno di x_0 I_{x_0} in cui il grafico si trova sopra alla tangente in $P(x_0; f(x_0))$



Poiché l'equazione della tangente risulta

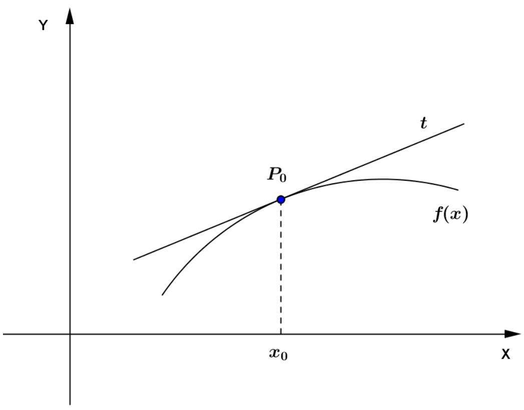
$$t: \quad y - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0) \quad \Rightarrow \quad y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

possiamo anche dire che **in** x_0 **il grafico volge la concavità verso l'alto**

$$\text{se } \exists \; I_{x_0} : \forall x \in I_{x_0} \quad f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

Definizione: diciamo che **in** x_0 **il grafico di** $f(x)$ **volge la concavità verso il basso** quando esiste un intorno di x_0 I_{x_0} in cui il grafico si trova sotto alla tangente in $P(x_0; f(x_0))$ cioè

$$\text{se } \exists \quad I_{x_0} : \forall x \in I_{x_0} \quad f(x) \leq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$



Per determinare la concavità è necessario studiare la derivata seconda perché abbiamo il seguente teorema:

Teorema : sia $f(x)$ continua in I con $f'(x), f''(x)$ continue e $x_0 \in I$.

- Se $f''(x_0) > 0 \Rightarrow$ in x_0 il grafico di $f(x)$ volge la concavità verso l'alto.
- Se $f''(x_0) < 0 \Rightarrow$ in x_0 il grafico di $f(x)$ volge la concavità verso il basso.

Dimostrazione

Supponiamo che $f''(x_0) > 0$

Consideriamo $\varphi(x) = f(x) - \left[f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)\right]$

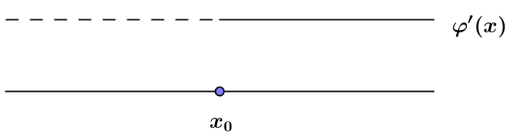
Osserviamo che $\varphi(x)$ rappresenta lo scarto funzione-tangente: per dimostrare che la concavità è rivolta verso l'alto basterà dimostrare che $\exists\ I_{x_0}$ in cui $\varphi(x) \geq 0$

Determiniamo:

$$\varphi'(x) = f'(x) - f'(x_0)$$
$$\varphi''(x) = f''(x)$$

Poiché quindi $\varphi''(x_0) = f''(x_0) > 0\ \exists\ I_{x_0}$ in cui $\varphi''(x) > 0$ (per la continuità di $f''(x)$).
Possiamo scrivere $\varphi''(x) = D(\varphi'(x)) > 0$ e allora, avendo derivata positiva, $\varphi'(x)$ è una funzione crescente.

Ma sostituendo x_0 abbiamo $\varphi'(x_0) = 0$ e quindi il segno di $\varphi'(x)$ sarà il seguente (poiché $\varphi'(x)$ deve essere crescente):



Ma allora $\varphi(x)$ ha un minimo in x_0 cioè

$$\exists\ I_{x_0} : \forall x \in I_{x_0} \qquad \varphi(x) \geq \varphi(x_0)$$

Ma sostituendo x_0 $\varphi(x_0) = 0$ e quindi

$$\exists\ I_{x_0} : \forall x \in I_{x_0} \qquad \varphi(x) \geq 0$$

Cioè il grafico volge la concavità verso l'alto (in x_0).

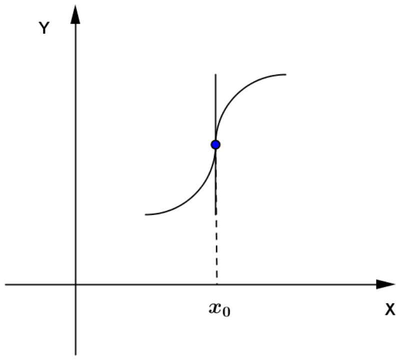
La dimostrazione della seconda parte è analoga.

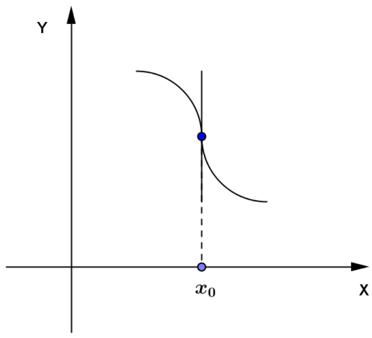
Flessi di una funzione

Definizione: x_0 si dice un punto di flesso per $f(x)$ se in x_0 il grafico della funzione **cambia concavità** e quindi il grafico "attraversa" la tangente in $P_0(x_0; f(x_0))$.

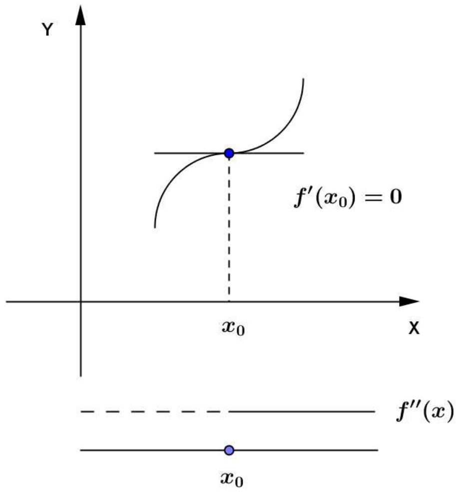
A seconda dell'inclinazione della tangente possiamo avere:

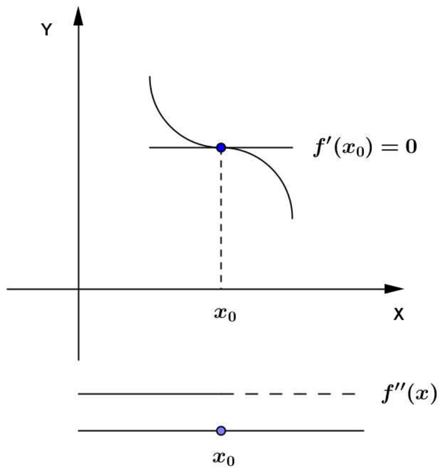
- **flesso a tangente verticale** : in questo caso $f(x)$ non è derivabile in x_0 e $\lim_{x \to x_0} f'(x) = +\infty$ o $\lim_{x \to x_0} f'(x) = -\infty$



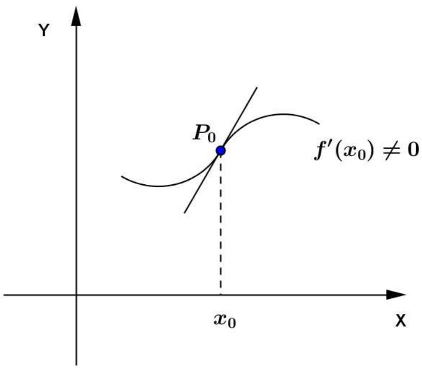


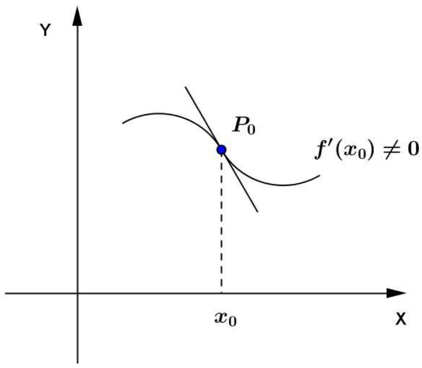
- **flesso a tangente orizzontale** : in x_0 $f'(x_0) = 0$ ma $f'(x)$ non cambia segno in x_0
  Cambia segno invece $f''(x)$ in x_0 (perché cambia la concavità) e $f''(x_0) = 0$.





- **flesso a tangente obliqua** : in x_0 $f'(x_0) \neq 0$ ma c'è un cambio di concavità e quindi $f''(x_0) = 0$ e $f''(x)$ **cambia segno**.



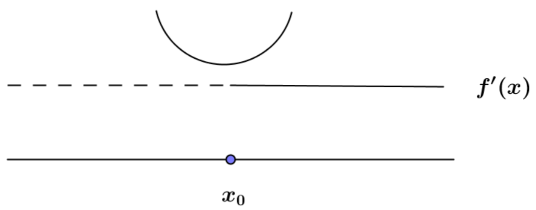


Ricerca dei punti di massimo, minimo, flesso a tangente orizzontale

Consideriamo un punto $x_0 \in D_f$ in cui $f'(x_0) = 0$, cioè un punto in cui la tangente è parallela all'asse x.
Potrebbe essere un punto di massimo o un punto di minimo o un punto di flesso a tangente orizzontale.

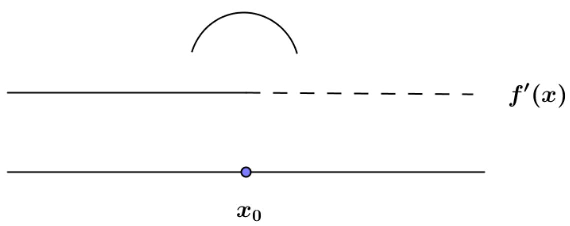
Per capirlo studiamo il segno di $f'(x)$.

1) Se il segno della derivata ha questo andamento



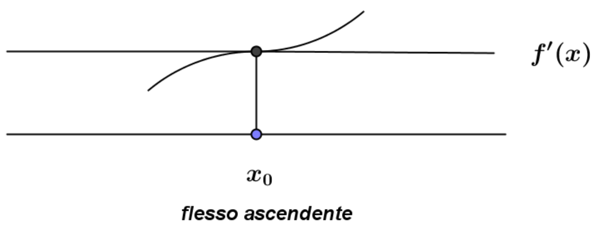
cioè negativo e poi positivo, poiché la $f(x)$ prima di x_0 decresce e poi cresce $\Rightarrow x_0$ è un punto di **MINIMO**.

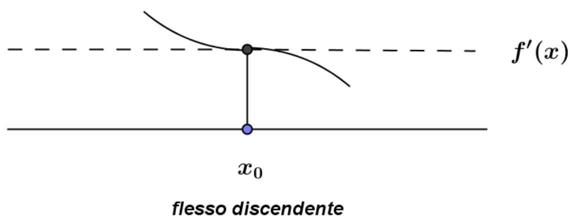
2) Se il segno della derivata ha questo andamento



la funzione prima di x_0 cresce e poi decresce $\Rightarrow x_0$ è un punto di **MASSIMO**.

3) Se $f'(x)$ non cambia segno in $x_0 \Rightarrow x_0$ è un punto di **FLESSO A TANGENTE ORIZZONTALE** (ascendente o discendente)





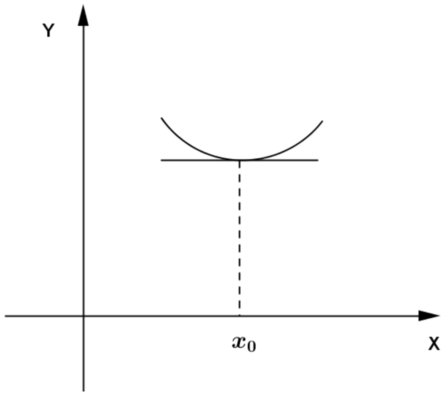
Flesso ascendente

Flesso discendente

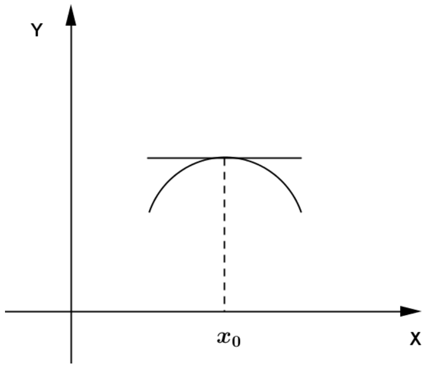
NOTA
Massimi, minimi e flessi con lo studio di $f''(x_0)$

Per individuare massimi e minimi possiamo utilizzare lo studio di $f''(x)$ piuttosto dello studio del segno di $f'(x)$.

- Se in x_0 abbiamo $f'(x_0)=0$ e $f''(x_0)>0$ (concavità verso l'alto) $\Rightarrow x_0$ è un punto di MINIMO



- Se in x_0 abbiamo $f'(x_0)=0$ e $f''(x_0)<0$ (concavità verso il basso) $\Rightarrow x_0$ è un punto di MASSIMO



Se in x_0 $f'(x_0)=0$ e $f''(x_0)=0$ dobbiamo studiare il segno di $f''(x)$: se cambia in x_0 allora x_0 è un punto di flesso a tangente orizzontale.

Si può dimostrare che

1) Se in x_0 $f'(x_0)=0$ e $f''(x_0)=f'''(x_0)=...=0$ e $f^{(n)}(x_0)\neq 0$,cioè se la derivata n-esima è la prima derivata diversa da 0 in x_0:

se n è pari $\Rightarrow x_0$ è un punto di massimo se $f^{(n)}(x_0)<0$
è un punto di minimo se $f^{(n)}(x_0)>0$

se n è dispari $\Rightarrow x_0$ è un punto di flesso a tangente orizzontale

2) Se in x_0 $f'(x_0)\neq 0$ ma $f''(x_0)=f'''(x_0)=...=0$ e $f^{(n)}(x_0)\neq 0$,cioè la derivata n-esima è la prima derivata diversa da 0 in x_0:

se n è pari $\Rightarrow$ in x_0 il grafico volge la concavità verso l'alto se $f^{(n)}(x_0)>0$
il grafico volge la concavità verso il basso se $f^{(n)}(x_0)<0$

se n è dispari $\Rightarrow x_0$ è un punto di flesso a tangente obliqua