

Indice

1	Insiemi	1
1.1	Concetti di base sugli insiemi	1
1.2	Insieme delle parti e prodotto cartesiano	3
1.3	Insiemi numerici fondamentali	3
2	Funzioni	5
2.1	Il concetto di funzione	5
3	Insiemi in \mathbb{R}	7
3.1	Intervalli	7
4	Limiti	9
4.1	Definizione di limite	9
4.2	Limite destro e limite sinistro	10
4.3	Operazioni tra limiti	11
4.4	Forme indeterminate	11

Capitolo 1

Insiemi

1.1 Concetti di base sugli insiemi

Un *insieme* è un raggruppamento di oggetti detti *elementi*, che possono essere di natura qualsiasi. Si dice che gli elementi di un insieme *appartengono* all'insieme.

Simboli

Per indicare gli insiemi si usano solitamente lettere maiuscole, come

$$A, B, C \dots$$

Per indicare gli elementi di un insieme si usano solitamente lettere minuscole ($a, b, c \dots$) e per indicare che un elemento x appartiene all'insieme A scriviamo

$$x \in A \quad \text{oppure} \quad A \ni x$$

Rappresentazione

È possibile rappresentare un insieme elencando i suoi elementi, in caso questo sia finito. Ad esempio

$$A = \{1, 2, 5\}$$

significa che l'insieme A ha come elementi i numeri 1, 2, 5. In questo caso si dice che l'abbiamo definito *per tabulazione*.

Oppure è possibile rappresentare un insieme descrivendolo mediante una proprietà che lo caratterizzi univocamente. Ad esempio

$$X = \{n : n \text{ intero pari}\}$$

Un insieme privo di elementi viene detto *insieme vuoto* e viene indicato con il simbolo \emptyset .

Relazioni tra insiemi: inclusione

Definizione 1.1. Si dice che un insieme X è un sottoinsieme di un insieme Y se ogni elemento di X appartiene ad Y . Si utilizza il simbolo di inclusione (larga) $X \subseteq Y$. Se X non coincide con Y , si usa il simbolo di inclusione stretta $X \subset Y$.

Relazioni tra insiemi: uguaglianza

Due insiemi sono uguali quando possiedono gli stessi elementi. Siano X e Y due insiemi. Allora $X = Y$ se e solo se $X \subseteq Y$ e $Y \subseteq X$.

Operazioni insiemistiche

- *Unione.* L'unione di due insiemi X e Y è definita da:

$$X \cup Y = \{x : x \in X \text{ o } x \in Y\}$$

È l'insieme degli elementi che appartengono sia al primo sia al secondo insieme.

- *Intersezione.* L'intersezione di due insiemi X e Y è definita da:

$$X \cap Y = \{x : x \in X \text{ e } x \in Y\}$$

È l'insieme degli elementi che appartengono al primo e al secondo insieme, intendendo la "o" in modo non esclusivo.

- *Unione.* La differenza tra due insiemi X e Y è definita da:

$$X \setminus Y = \{x : x \in X \text{ e } x \notin Y\}$$

È l'insieme degli elementi che appartengono al primo ma non al secondo insieme.

- *Complementare.* È un tipo particolare di differenza. Siano X e Y insiemi con $X \subseteq Y$. Si definisce insieme complementare di X in Y l'insieme $Y \setminus X$. Si indica con il simbolo X^C .

Proprietà delle operazioni insiemistiche

- *Proprietà dell'unione.*

commutativa: $X \cup Y = Y \cup X$

associativa: $(X \cup Y) \cup Z = X \cup (Y \cup Z)$

idempotenza: $X \cup X = X$

- *Proprietà dell'intersezione.*

commutativa: $X \cap Y = Y \cap X$

associativa: $(X \cap Y) \cap Z = X \cap (Y \cap Z)$

idempotenza: $X \cap X = X$

- *Proprietà distributive.*

$$X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$$

$$X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$$

- *Formule di De Morgan.* Siano $A, B \subseteq X$ e denotiamo con A^C e B^C i loro insiemi complementari in X .

$$(A \cup B)^C = A^C \cap B^C$$

$$(A \cap B)^C = A^C \cup B^C$$

1.2 Insieme delle parti e prodotto cartesiano

Insieme delle parti

Dato un insieme X , si dice *insieme delle parti* di X l'insieme di tutti i sottoinsiemi di X . Si indica con \mathcal{P}^X o con 2^X . Ad esempio, si consideri l'insieme $X = \{1, 4, 5\}$:

$$\mathcal{P}(X) = \{\emptyset, \{1\}, \{4\}, \{5\}, \{1, 4\}, \{1, 5\}, \{4, 5\}, \{1, 4, 5\}\}$$

Se X è un insieme finito con n elementi, allora $\mathcal{P}(X)$ è un insieme finito con 2^n elementi. Se X è un insieme infinito, allora anche $\mathcal{P}(X)$ è un insieme infinito.

Prodotto cartesiano

Si dice *coppia* un insieme ordinato di due elementi. Ad esempio:

$$\begin{aligned} \{3, 7\} &= \{7, 3\} : \text{insieme non ordinato} \\ \{3, 7\} &\neq \{7, 3\} : \text{insieme ordinato (coppia)} \end{aligned}$$

Dati due insiemi X e Y , il *prodotto cartesiano* di X e Y è l'insieme delle coppie (x, y) in cui $x \in X$ e $y \in Y$.

$$X \times Y = \{(x, y) : x \in X \text{ e } y \in Y\}$$

L'insieme dei numeri reali è indicato con \mathbb{R} , e il prodotto cartesiano $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ viene indicato con \mathbb{R}^2 .

$$\mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(x, y) : x, y \in \mathbb{R}\}$$

1.3 Insiemi numerici fondamentali

\mathbb{N} insieme dei numeri naturali (interi positivi, zero compreso)

$$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots\}$$

\mathbb{Z} insieme dei numeri interi

$$\mathbb{Z} = \{0, 1, -1, 2, -2, 3, -3, \dots\}$$

\mathbb{Q} insieme dei numeri razionali (sono frazioni di numeri interi)

$$\mathbb{Q} = \left\{ \frac{a}{b} : a \in \mathbb{Z} \text{ e } b \in \mathbb{Z} \setminus \{0\} \right\}$$

\mathbb{R} insieme dei numeri reali

\mathbb{I} insieme dei numeri irrazionali ($\mathbb{I} = \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$)

Capitolo 2

Funzioni

2.1 Il concetto di funzione

Definizione 2.1. Siano $X, Y \neq \emptyset$. Si dice *funzione da X in Y* una legge che fa corrispondere ad ogni elemento di X uno ed un solo elemento di Y . L'insieme X viene detto *dominio della funzione* mentre l'insieme Y viene detto *codominio della funzione*.

Viene utilizzata la seguente notazione:

$$f : X \rightarrow Y \text{ (} f \text{ definita da } X \text{ a } Y\text{)} \qquad f : x \mapsto f(x) \text{ (} f \text{ associa } f(x) \text{ ad } x\text{)}$$

Per ogni $x \in X$, l'elemento di Y che la funzione f fa corrispondere a x viene detto *immagine* di x mediante f e si indica con $f(x)$. La proprietà caratteristica di f , affinché la si possa chiamare funzione, è l'*univocità* della corrispondenza: assegnato l'elemento in "ingresso" $a \in A$, l'elemento in "uscita" $b = f(a)$ dev'essere univocamente determinato.

Definizione 2.2. Siano $X, Y \neq \emptyset$ e sia $f : X \rightarrow Y$. Si dice *grafico di f* l'insieme

$$\mathcal{G}(f) = \{(x, y) \in X \times Y : x \in X \text{ e } y = f(x)\}$$

Ossia, il grafico di una funzione f è l'insieme dei punti del piano di coordinate (x, y) con $y = f(x)$ e x variabile nel dominio D .

Definizione 2.3. Siano $X, Y \neq \emptyset$ e sia $f : X \rightarrow Y$. Siano rispettivamente $A \subseteq X$ e $B \subseteq Y$. Si dice *immagine di A* il sottoinsieme di Y costruito dalle immagini dei singoli elementi di A . Tale insieme viene denotato con $f(A)$. In altre parole si ha

$$f(A) = \{f(x) \in Y : x \in A\} \subseteq Y$$

Si dice *immagine inversa di B* o *controimmagine di B* il sottoinsieme di X costituito da quegli elementi di X la cui immagine appartiene a B . Tale insieme viene denotato con $f^{-1}(B)$. In altre parole si ha

$$f^{-1}(B) = \{x \in X : f(x) \in B\} \subseteq X$$

Definizione 2.4. Siano $X, Y \neq \emptyset$ e sia $f : X \rightarrow Y$. Sia inoltre $A \subseteq X$ insieme non vuoto. Si dice *restrizione di f all'insieme A* la funzione

$$f|_A : A \rightarrow Y$$

Teorema 2.1. Siano $X, Y \neq \emptyset$ e sia $f : X \rightarrow Y$. Siano inoltre $A, B \subseteq X$ e $C, D \subseteq Y$. Valgono le seguenti conclusioni:

1. $f(A \cup B) = f(A) \cup f(B)$
2. $f(A \cap B) = f(A) \cap f(B)$
3. $f^{-1}(f(A)) \supset A$
4. $f^{-1}(C \cup D) = f^{-1}(C) \cup f^{-1}(D)$
5. $f^{-1}(C \cap D) = f^{-1}(C) \cap f^{-1}(D)$
6. $f(f^{-1}(C)) \subseteq C$

Definizione 2.5. Siano X, Y, Z insiemi non vuoti. Siano $f : Y \rightarrow Z$ e $g : X \rightarrow Y$. Viene detta composizione di f con g la funzione $f \circ g$ definita da

$$f \circ g : X \rightarrow Z$$

Definizione 2.6. Siano X e Y insiemi non vuoti e sia $f : X \rightarrow Y$. Si dice che f è iniettiva se elementi distinti del dominio X hanno immagini distinte:

$$x_1, x_2 \in X, x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$$

Definizione 2.7. Siano X e Y insiemi non vuoti e sia $f : X \rightarrow Y$. Si dice che f è suriettiva se ogni elemento del codominio Y è immagine di almeno un elemento del dominio X :

$$\forall y \in Y, \exists x \in X : f(x) = y$$

Definizione 2.8. Siano X e Y insiemi non vuoti e sia $f : X \rightarrow Y$. Si dice che f è biettiva (biiettiva o biunivoca) se è contemporaneamente iniettiva e suriettiva. In altre parole, si dice che f è biettiva se ogni elemento del codominio Y è immagine di esattamente un elemento del dominio X :

$$\forall y \in Y, \exists! x \in X : f(x) = y$$

Dato un insieme X non vuoto, indicheremo con $Id_X : X \rightarrow X$ la *funzione identità*, cioè quella funzione che ad ogni $x \in X$ associa se stesso:

$$Id_X(x) = x \quad \forall x \in X$$

Definizione 2.9. Siano X e Y insiemi non vuoti e sia $f : X \rightarrow Y$. Si dice che f è invertibile se esiste una funzione $g : Y \rightarrow X$ tale che $f \circ g = Id_Y$ e $g \circ f = Id_X$. In altre parole si ha che:

$$f(g(y)) = y \quad \forall y \in Y \qquad g(f(x)) = x \quad \forall x \in X$$

Se f è invertibile, una tale funzione g è unica e viene denominata *funzione inversa* di f . Si indica con il simbolo $f^{-1} : Y \rightarrow X$.

Teorema 2.2. Siano X e Y insiemi non vuoti e sia $f : X \rightarrow Y$. Allora f è invertibile se e solo se f è biettiva.

Definizione 2.10. Siano X e Y due insiemi non vuoti. Si dice che X e Y hanno la stessa cardinalità se esiste una funzione $f : X \rightarrow Y$ biettiva.

Non tutti gli insiemi infiniti hanno la stessa cardinalità. Gli insiemi con la stessa cardinalità di \mathbb{N} si dicono *numerabili*. Gli insiemi \mathbb{Z} e \mathbb{Q} sono numerabili ed hanno quindi la stessa cardinalità di \mathbb{N} , nonostante $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q}$. L'insieme \mathbb{R} dei numeri reali non è numerabile: ha una cardinalità di *ordine superiore* rispetto ad \mathbb{N} .

Capitolo 3

Insiemi in \mathbb{R}

3.1 Intervalli

Si dice *intervallo* un sottoinsieme di \mathbb{R} tale per cui ogni numero reale compreso tra due elementi di questo sottoinsieme appartiene al sottoinsieme medesimo.

Dati $a, b \in \mathbb{R}$ con $a < b$, si definiscono i seguenti intervalli:

$$[a, b] = \{x \in \mathbb{R} : a \leq x \leq b\} \qquad (a, b) = \{x \in \mathbb{R} : a < x < b\}$$

Anche un insieme costituito da un solo numero reale va considerato un intervallo.

Definizione 3.1. Sia $X \subseteq \mathbb{R}$ un insieme non vuoto:

1. si dice che X è limitato superiormente se esiste $a \in \mathbb{R}$ tale che

$$\forall x \in X \rightarrow x \leq a$$

2. si dice che X è limitato inferiormente se esiste $a \in \mathbb{R}$ tale che

$$\forall x \in X \rightarrow x \geq a$$

3. si dice che X è limitato se è contemporaneamente limitato inferiormente e superiormente

Definizione 3.2. Sia $X \subseteq \mathbb{R}$ un insieme non vuoto:

1. si dice $a \in \mathbb{R}$ è un maggiorante di X se

$$\forall x \in X \rightarrow x \leq a$$

2. si dice $a \in \mathbb{R}$ è un minorante di X se

$$\forall x \in X \rightarrow x \geq a$$

Definizione 3.3. Sia $X \subseteq \mathbb{R}$ un insieme non vuoto:

1. si dice che $a \in \mathbb{R}$ è un massimo ($\max X$) di X se a è un maggiorante di X e $a \in X$
2. si dice che $a \in \mathbb{R}$ è un minimo ($\min X$) di X se a è un minorante di X e $a \in X$

Se X ammette un massimo, tale massimo è unico. Analogamente, se X ammette un minimo, tale minimo è unico.

Definizione 3.4. *Sia $X \subseteq \mathbb{R}$ un insieme non vuoto:*

1. *si dice che $a \in \mathbb{R}$ è l'estremo superiore ($\sup X$) di X se a è il minimo dell'insieme dei maggioranti di X*
2. *si dice che $a \in \mathbb{R}$ è l'estremo inferiore ($\inf X$) di X se a è il massimo dell'insieme dei minoranti di X*

Teorema 3.1 (Completezza di \mathbb{R}). *Sia $X \subseteq \mathbb{R}$ un insieme non vuoto:*

1. *se X è limitato superiormente, allora X ammette un estremo superiore*
2. *se X è limitato inferiormente, allora X ammette un estremo inferiore*

Capitolo 4

Limiti

4.1 Definizione di limite

Definizione 4.1. Sia $x_0 \in \mathbb{R}$ e sia $R > 0$. Si dice intorno di x_0 di raggio R l'intervallo $(x_0 - R, x_0 + R)$.

Si ha che x appartiene all'intorno di raggio R se e soltanto se $|x - x_0| < R$.

Definizione 4.2. Sia $X \subseteq \mathbb{R}, X \neq \emptyset$. Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Sia $x_0 \in \mathbb{R}$ tale per cui esista $R > 0$ tale che

$$X \supseteq (x_0 - R, x_0 + R) \setminus \{x_0\}$$

Sia $\ell \in \mathbb{R}$. Si dice che ℓ è il limite di f per x che tende a x_0 se

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : |x - x_0| < \delta \implies |f(x) - \ell| < \varepsilon$$

x_0 non deve necessariamente far parte del dominio della funzione.

Definizione 4.3. Sia $X \subset \mathbb{R}, X \neq \emptyset$. Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Sia $x_0 \in \mathbb{R}$ tale per cui esista $R > 0$ tale che

$$X \supseteq (x_0 - R, x_0 + R) \setminus \{x_0\}$$

1. si dice che $+\infty$ è il limite di f per x che tende a x_0 se

$$\forall M > 0, \exists \delta > 0 : |x - x_0| < \delta \implies f(x) > M$$

2. si dice che $-\infty$ è il limite di f per x che tende a x_0 se

$$\forall M > 0, \exists \delta > 0 : |x - x_0| < \delta \implies f(x) < -M$$

Definizione 4.4. Sia $X \subset \mathbb{R}, X \neq \emptyset$.

1. Supponiamo che esista $a \in \mathbb{R}$ per cui si abbia

$$X \supseteq (a, +\infty)$$

Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Sia $\ell \in \mathbb{R}$. Si dice che ℓ è il limite di f per x che tende a $+\infty$ se

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N > 0 : x > N \implies |f(x) - \ell| < \varepsilon$$

2. Supponiamo che esista $a \in \mathbb{R}$ per cui si abbia

$$X \supseteq (-\infty, a)$$

Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Sia $\ell \in \mathbb{R}$. Si dice che ℓ è il limite di f per x che tende a $-\infty$ se

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N > 0 : x < -N \implies |f(x) - \ell| < \varepsilon$$

Definizione 4.5. Sia $X \subset \mathbb{R}, X \neq \emptyset$.

1. Supponiamo che esista $a \in \mathbb{R}$ per cui si abbia

$$X \supseteq (a, +\infty)$$

Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Si dice che $+\infty$ è il limite di f per x che tende a $+\infty$ se

$$\forall M > 0, \exists N > 0 : x > N \implies f(x) > M$$

2. Supponiamo che esista $a \in \mathbb{R}$ per cui si abbia

$$X \supseteq (a, +\infty)$$

Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Si dice che $-\infty$ è il limite di f per x che tende a $+\infty$ se

$$\forall M > 0, \exists N > 0 : x > N \implies f(x) < -M$$

3. Supponiamo che esista $a \in \mathbb{R}$ per cui si abbia

$$X \supseteq (-\infty, a)$$

Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Si dice che $+\infty$ è il limite di f per x che tende a $-\infty$ se

$$\forall M > 0, \exists N > 0 : x < -N \implies f(x) > M$$

4. Supponiamo che esista $a \in \mathbb{R}$ per cui si abbia

$$X \supseteq (-\infty, a)$$

Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Si dice che $-\infty$ è il limite di f per x che tende a $-\infty$ se

$$\forall M > 0, \exists N > 0 : x < -N \implies f(x) < -M$$

4.2 Limite destro e limite sinistro

Definizione 4.6 (Limite destro). Sia $X \subset \mathbb{R}, X \neq \emptyset$. Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Sia x_0 tale per cui esista $R > 0$ tale che

$$X \supseteq (x_0, x_0 + R) \quad (X \text{ contiene un intorno destro di } x_0)$$

1. Sia $\ell \in \mathbb{R}$. Si dice che ℓ è il limite destro di f per x che tende a x_0 da destra se

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : |x - x_0| < \delta \implies |f(x) - \ell| < \varepsilon$$

2. Si dice che $+\infty$ è il limite destro di f per x che tende a x_0 da destra se

$$\forall M > 0, \exists \delta > 0 : |x \in (x_0, x_0 + \delta) \implies f(x) > M$$

3. Si dice che $-\infty$ è il limite destro di f per x che tende a x_0 da destra se

$$\forall M > 0, \exists \delta > 0 : |x \in (x_0, x_0 + \delta) \implies f(x) < -M$$

Definizione 4.7 (Limite sinistro). Sia $X \subset \mathbb{R}, X \neq \emptyset$. Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Sia x_0 tale per cui esista $R > 0$ tale che

$$X \supseteq (x_0 - R, x_0 + R) \quad (X \text{ contiene un intorno destro di } x_0)$$

1. Sia $\ell \in \mathbb{R}$. Si dice che ℓ è il limite sinistro di f per x che tende a x_0 da destra se

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : |x \in (x_0 - \delta, x_0) \implies |f(x) - \ell| < \varepsilon$$

2. Si dice che $+\infty$ è il limite sinistro di f per x che tende a x_0 da destra se

$$\forall M > 0, \exists \delta > 0 : |x \in (x_0 - \delta, x_0) \implies f(x) > M$$

3. Si dice che $-\infty$ è il limite sinistro di f per x che tende a x_0 da destra se

$$\forall M > 0, \exists \delta > 0 : |x \in (x_0 - \delta, x_0) \implies f(x) < -M$$

Teorema 4.1. Sia $X \subset \mathbb{R}, X \neq \emptyset$. Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Sia $x_0 \in \mathbb{R}$ tale per cui esista $R > 0$ tale che

$$X \supseteq (x_0 - R, x_0 + R) \setminus \{x_0\}$$

Allora

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$$

esiste se e solo se esistono e coincidono tra di loro

$$\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) \qquad \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x)$$

4.3 Operazioni tra limiti

Teorema 4.2. Sia $X \subset \mathbb{R}, X \neq \emptyset$. Sia $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. Supponiamo che le funzioni f e g ammettano limiti finiti. Allora si ha:

1. $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x)) = \ell_1 + \ell_2$
2. $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) - g(x)) = \ell_1 - \ell_2$
3. $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) \cdot g(x)) = \ell_1 \cdot \ell_2$
4. se $c \in \mathbb{R}$, $\lim_{x \rightarrow x_0} cf(x) = c \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$
5. se $g(x) \neq 0$ e $\ell_2 \neq 0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x)/g(x)) = \ell_1/\ell_2$

4.4 Forme indeterminate