

MACCHINE ASINCRONE

1. Aspetti costruttivi e tecnologici
2. Dimensionamento e progetto
3. Calcolo e verifica

Aspetti costruttivi e tecnologici

- Classificazione IP, IC, IM, S
- Statore e carcassa
- Rotore
- Avvolgimenti

GRADO DI PROTEZIONE (IP)

Il grado di protezione della macchina elettrica definisce in che modo e in che misura le parti attive della macchina (avvolgimenti e nuclei magnetici) sono separati fisicamente dall'ambiente circostante.

Rispetto al grado di protezione, le macchine si distinguono in:

- Aperte: le parti attive sono direttamente accessibili
- Protette: l'involucro consente l'ingresso dell'aria di raffreddamento
- Chiuse: l'involucro è stagno, cioè tale da impedire l'ingresso dell'aria esterna
- Per atmosfere esplosive. Si distinguono due sottocasi:
 - l'involucro può consentire l'ingresso di gas esterni ma è costruito in modo da resistere ad esplosioni da essi innescate;
 - macchine con aria interna mantenuta in pressione in modo da impedire l'ingresso dell'aria intera.

Il grado di protezione è identificato convenzionalmente da una sigla del tipo:

IP□□

IP sta per “macchina protetta”. Vediamo il significato delle 2 cifre caratteristiche.

1° NUMERO CARATTERISTICO:

GRADO DI PROTEZIONE PER LA SICUREZZA PERSONE E
CONTRO INGRESSO *CORPI SOLIDI*

1° N.C.	PROTEZIONE
0	Macchina non protetta (aperta)
1	Macchina protetta contro ingresso corpi solidi $D \geq 50$ mm
2	Macchina protetta contro ingresso corpi solidi $D \geq 12$ mm
4	Macchina protetta contro ingresso corpi solidi $D \geq 1$ mm
5	Macchina protetta contro ingresso della polvere

2° NUMERO CARATTERISTICO:

GRADO DI PROTEZIONE CONTRO L'INGRESSO NOCIVO
DI *ACQUA*

2° N.C.	PROTEZIONE
0	Macchina non protetta
1	Macchina protetta contro il gocciolamento d'acqua
2	Macchina protetta contro gocce d'acqua che cadono con un angolo $\leq 15^\circ$ rispetto la verticale
3	Macchina protetta contro gocce d'acqua che cadono con un angolo $\leq 60^\circ$ rispetto la verticale
4	Macchina protetta contro spruzzi (da qualsiasi direzione)
5	Macchina protetta contro getti
6	Macchina protetta contro le condizioni ambientali che si hanno sul ponte di una nave
7	Macchina protetta contro gli effetti di immersione
8	Macchine per funzionamento sottomarino

METODO DI RAFFREDDAMENTO (IC)

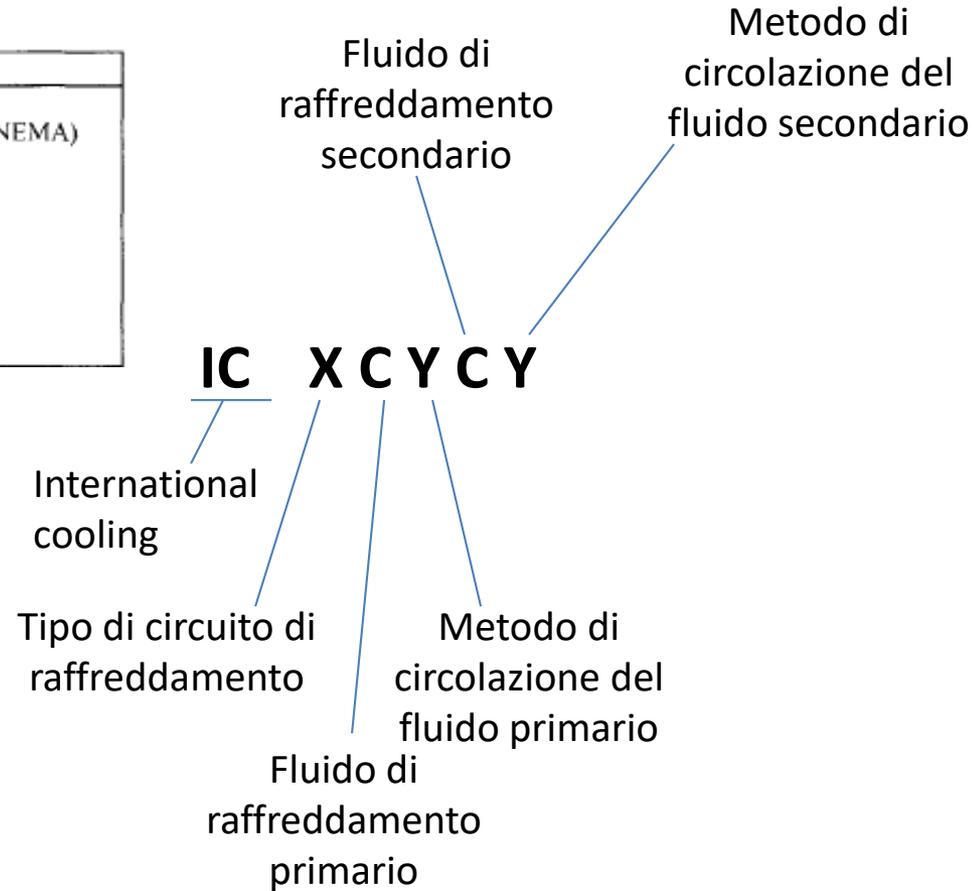
- Per il raffreddamento e la ventilazione delle macchine elettriche ed in particolare delle macchine rotanti, ci si avvale della circolazione di fluidi di raffreddamento all'interno delle varie parti che compongono la macchina. I fluidi maggiormente usati sono:
- | GAS | | LIQUIDI | |
|-----------------|---|---------|---|
| Aria | A | Acqua | W |
| Idrogeno | H | Olio | U |
| Azoto | N | | |
| CO ₂ | C | | |
- Si può avere:
 - Circuito aperto nel quale il prelievo e lo scarico del fluido avviene nell'ambiente esterno.
 - Circuito chiuso nel quale il fluido primario scambia calore con l'esterno attraverso refrigeranti ed un fluido secondario. Nel caso di ventilazione a ciclo chiuso, si distingue: il fluido primario e il fluido secondario.
- Il fluido primario, circolando all'interno della macchina (circuito primario) ne asporta il calore vendendo direttamente a contatto con le parti attive.

- Il fluido secondario (di solito aria o acqua) scambia calore con il fluido primario raffreddandolo e cedendo il calore all'ambiente.
- Sia nel circuito primario che nel circuito secondario, il fluido di raffreddamento (se gas) può essere fatto circolare mediante ventilatori coassiali al rotore (autoventilazione) o con elettroventilatori esterni (ventilazione assistita).
- Si ha:
 - Raffreddamento indiretto quando il fluido che asporta calore dalle parti attive lambisce i conduttori dall'esterno, quindi con interposizione di barriera isolante.
 - Raffreddamento diretto quando il fluido circola a diretto contatto con i conduttori, tipicamente fluendo in canali ricavati al loro interno.

Secondo la normativa italiana ed europea (CEI 2-7/97- IEC 34 – 6), il metodo di raffreddamento è identificato in modo standard usando un codice del tipo:

CIFRA "C"

Code	Description
A	Air (can be omitted in simple version)
F	Freon *(Referred to as Refrigerant in NEMA)
H	Hydrogen
N	Nitrogen
C	Carbon Dioxide
W	Water
U	Oil
S	Any Other Coolant
Y	Coolant Not Yet Selected



NOTE

Se uno dei due fluidi è l'aria, la lettera A viene di solito omessa. Ad esempio:

IC 8A6W viene scritto IC 86W.

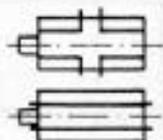
Se il fluido secondario è acqua, viene tipicamente omessa (in quanto non necessaria) la cifra Y che rappresenta la modalità di circolazione.

CIFRA "X"

CIFRA "Y"

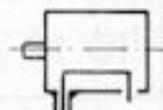
Prima cifra caratteristica (disposizione)

0



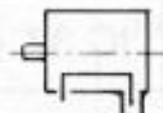
Circolazione libera

1



Un canale di aspirazione

2



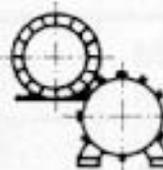
Un canale di scarico

3



Due canali (aspirazione e scarico)

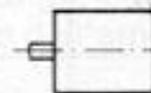
4



Macchina a raffreddamento superficiale utilizzando il flusso circostante

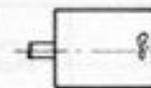
Seconda cifra caratteristica (circolazione)

0



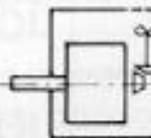
Libera convezione

1



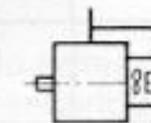
Autocircolazione

2



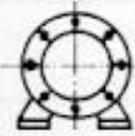
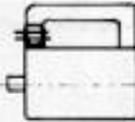
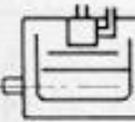
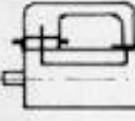
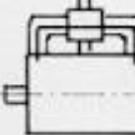
Dispositivo incorporato non montato sull'albero

3

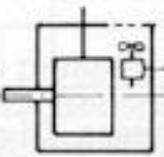
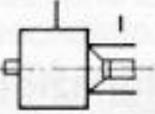
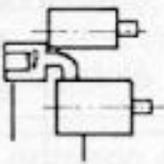
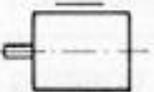


Dispositivo dipendente montato sulla macchina

CIFRA "X"

5		Scambiatore incorporato (utilizzante il mezzo circostante)
6		Scambiatore montato sulla macchina (utilizzante il mezzo circostante)
7		Scambiatore incorporato (non utilizzando il mezzo circostante)
8		Scambiatore montato sulla macchina (non utilizzando il mezzo circostante)
9		Scambiatore montato separatamente

CIFRA "Y"

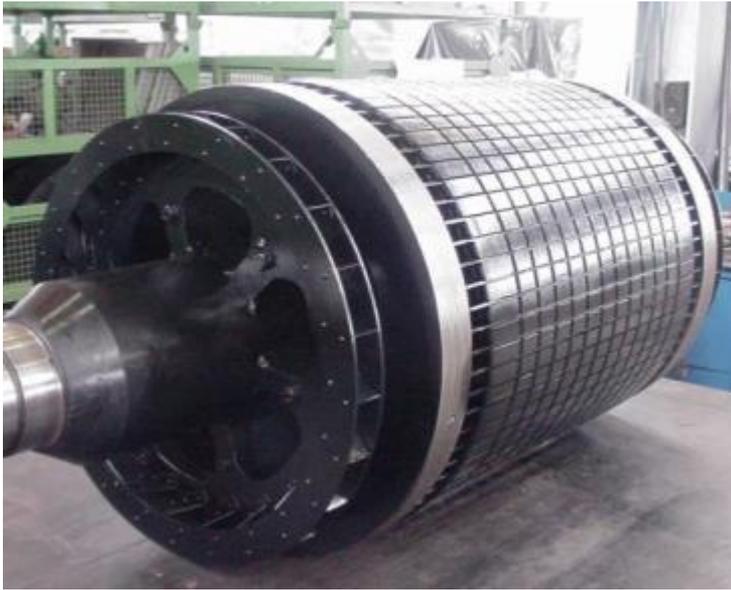
5		Dispositivo incorporato e indipendente
6		Dispositivo montato sulla macchina e indipendente
7		Dispositivo separato e indipendente o sistema di distribuzione
8		Spostamento relativo

Quando il raffreddamento avviene sono a mezzo di aria a ciclo aperto, non ha senso indicare le ultime due cifre. Quindi si usa una sigla semplificata del tipo:

IC XY

con X che indica il tipo di circuito di raffreddamento e Y il modo in cui l'aria è fatta circolare.

Seguono alcuni esempi delle tipologie di raffreddamento più comuni e importanti



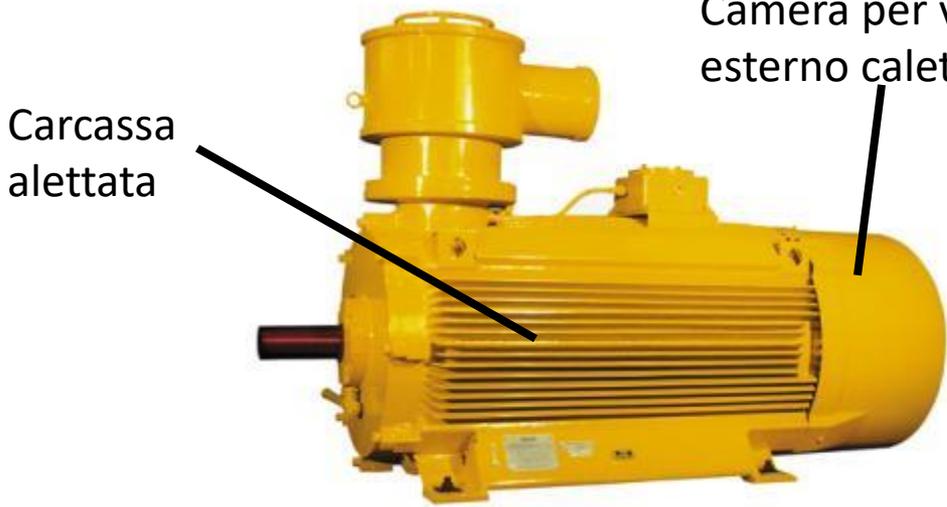
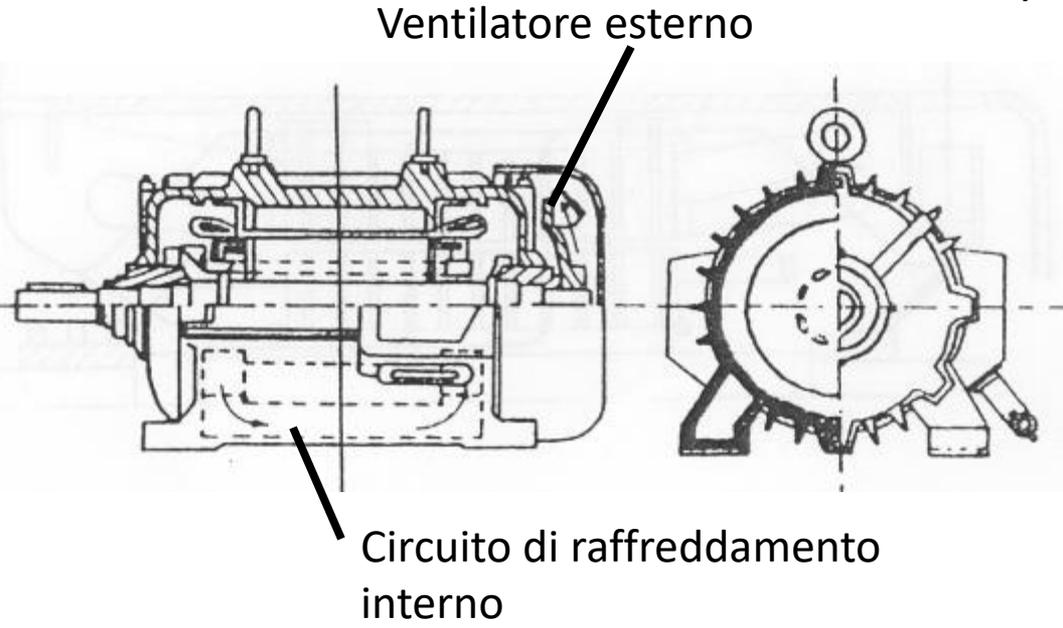
Ventilatore radiale montato sull'albero

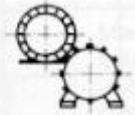


Ventilatore radiale e montato sull'albero

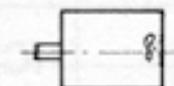
Macchine raffreddate a ciclo chiuso con carcassa alettata

«Totally Enclosed Fan Cooled» «TEFC»

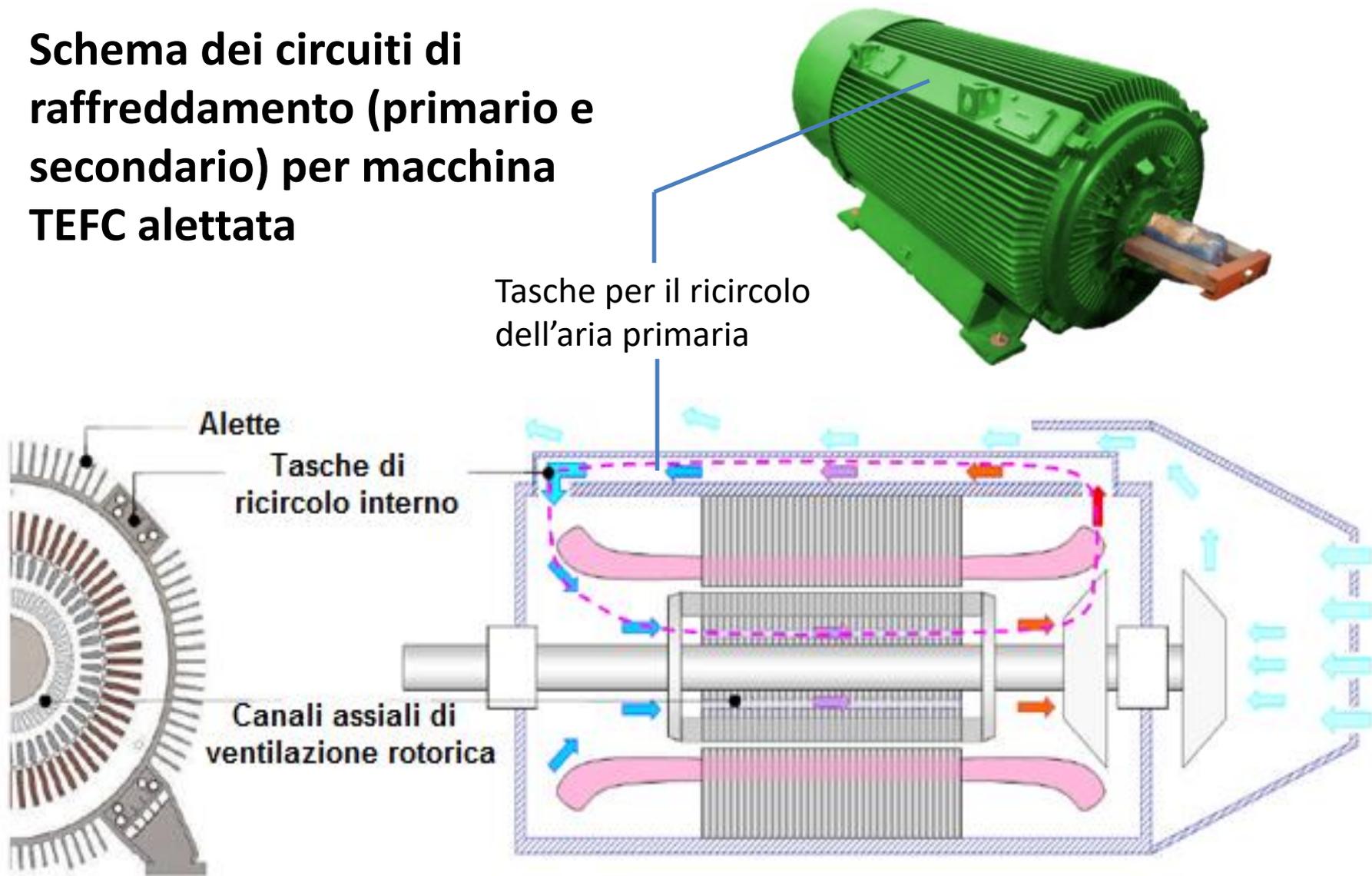


4		Macchina a raffreddamento superficiale utilizzando il flusso circostante
---	---	--

IC 411

1		Autocircolazione
---	---	------------------

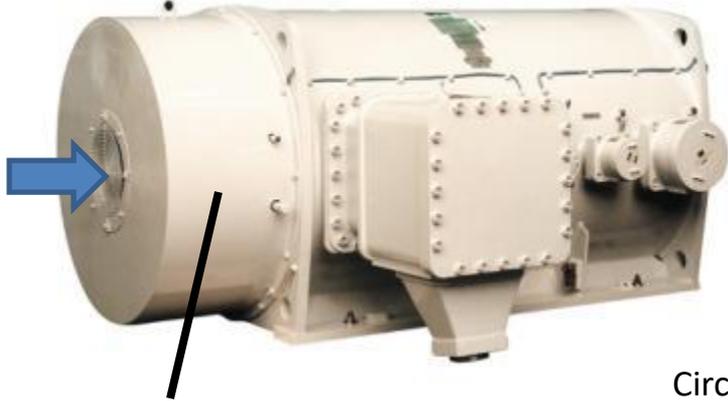
Schema dei circuiti di raffreddamento (primario e secondario) per macchina TEFC alettata



*Si nota che la ventilazione primaria è di tipo «assiale»
(singolo ventilatore interno)*

Macchina chiusa con scambiatore di calore incorporato nella carcassa

«TEFC»



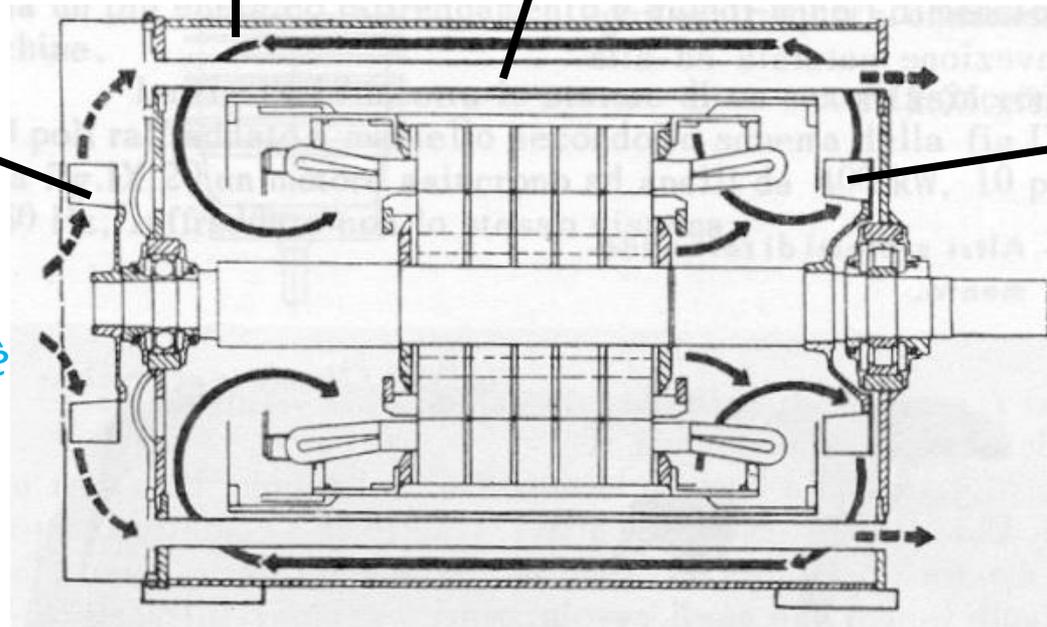
Ventilatore esterno che spinge l'aria nei tubi dello scambiatore



Circuito interno di ventilazione

Tubo per passaggio aria secondaria

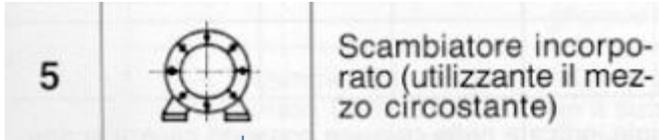
Scambiatore integrato nella carcassa



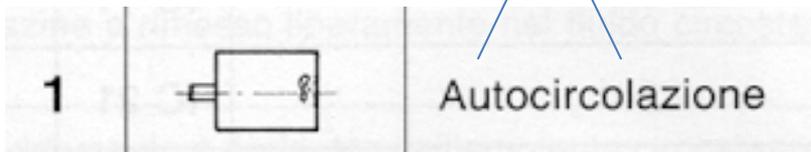
Ventilatore esterno

Si nota che la ventilazione primaria è di tipo «assiale» (singolo ventilatore interno)

IC 511



IC 511

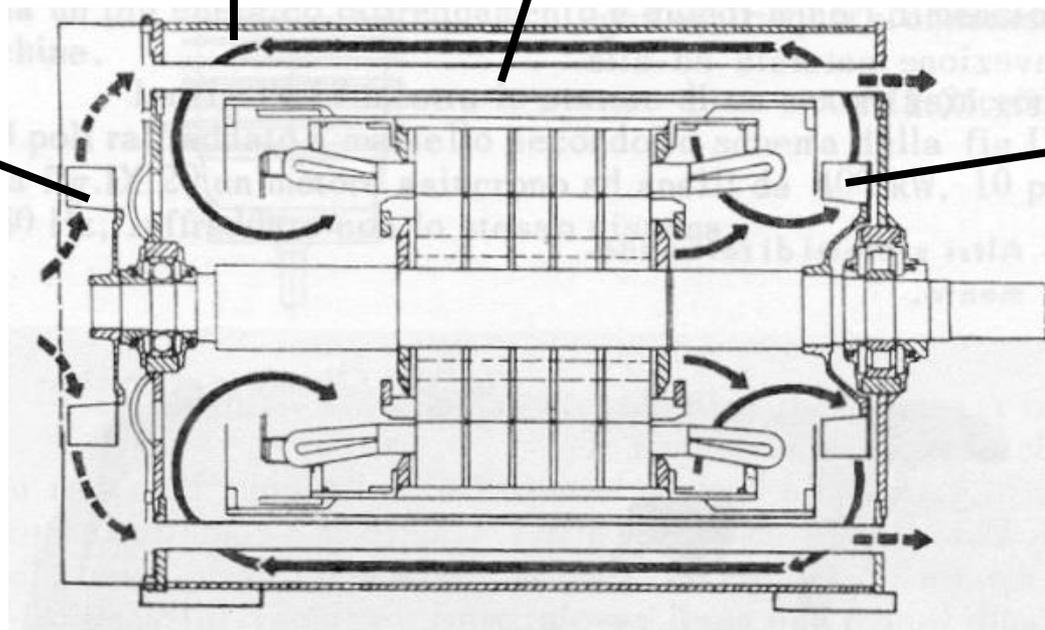


Ventilatore esterno che spinge l'aria nei tubi dello scambiatore

Circuito interno di ventilazione

Tubo per passaggio aria secondaria

Scambiatore integrato nella carcassa



Ventilatore interno

Si nota che la ventilazione primaria è di tipo «assiale» (singolo ventilatore interno)

Macchina chiusa autoventilata con scambiatore aria-aria montato sulla carcassa

Scambiatore aria-aria

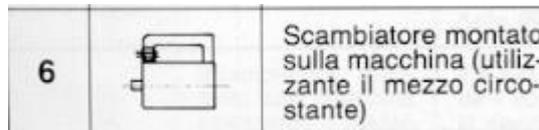


Tubi per aria secondaria

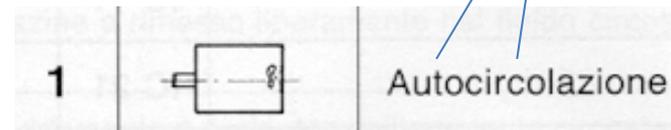
Aria esterna (secondaria)

Ventilatore esterno

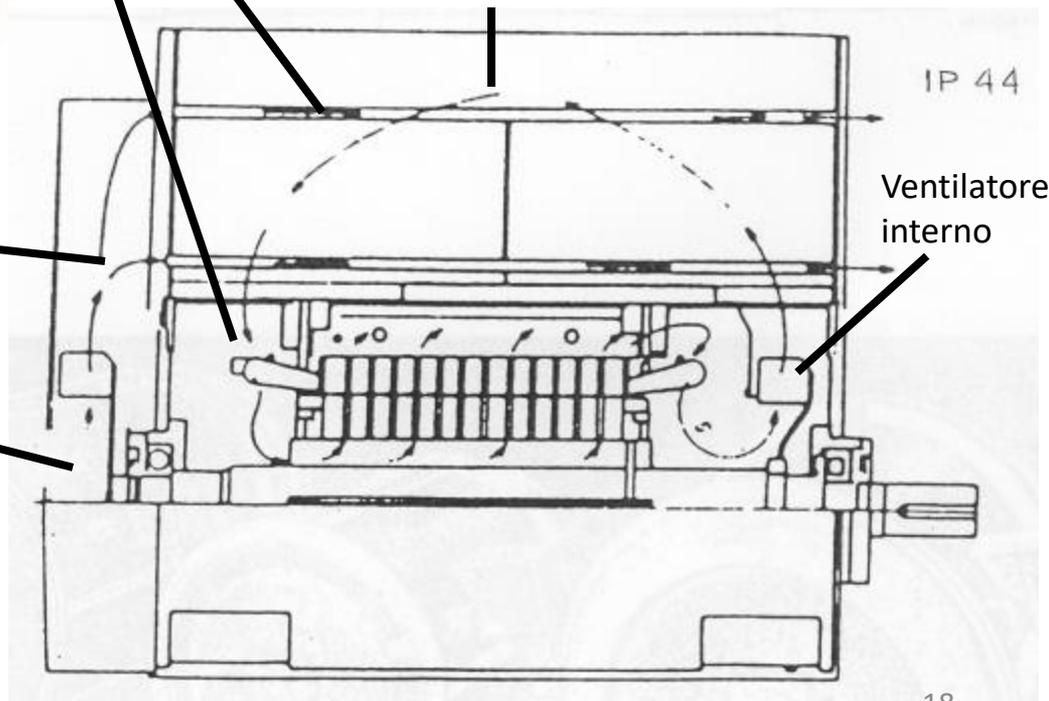
Si nota che la ventilazione primaria è, in questo caso, di tipo «mista» (singolo ventilatore interno)

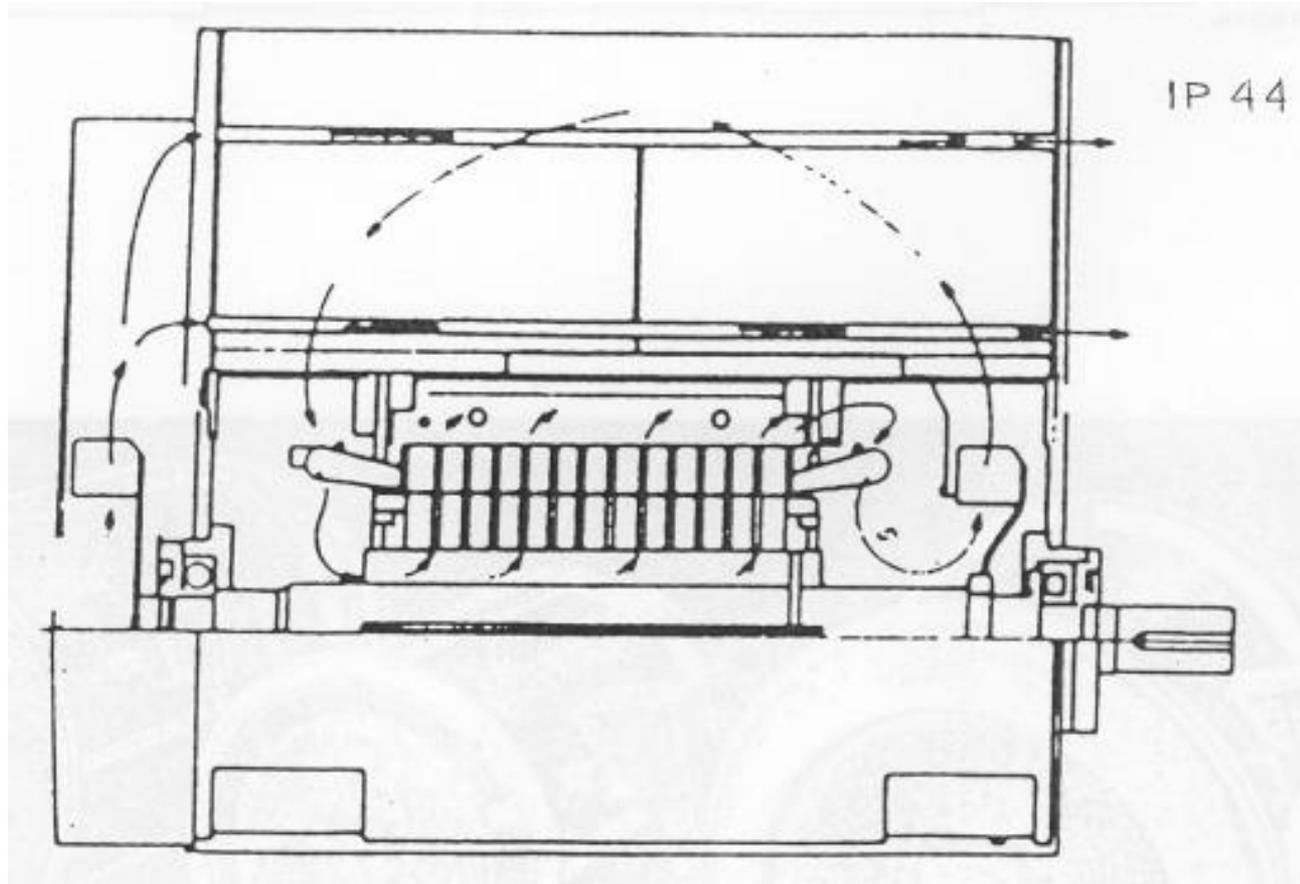


IC 611



Aria esterna (primaria)





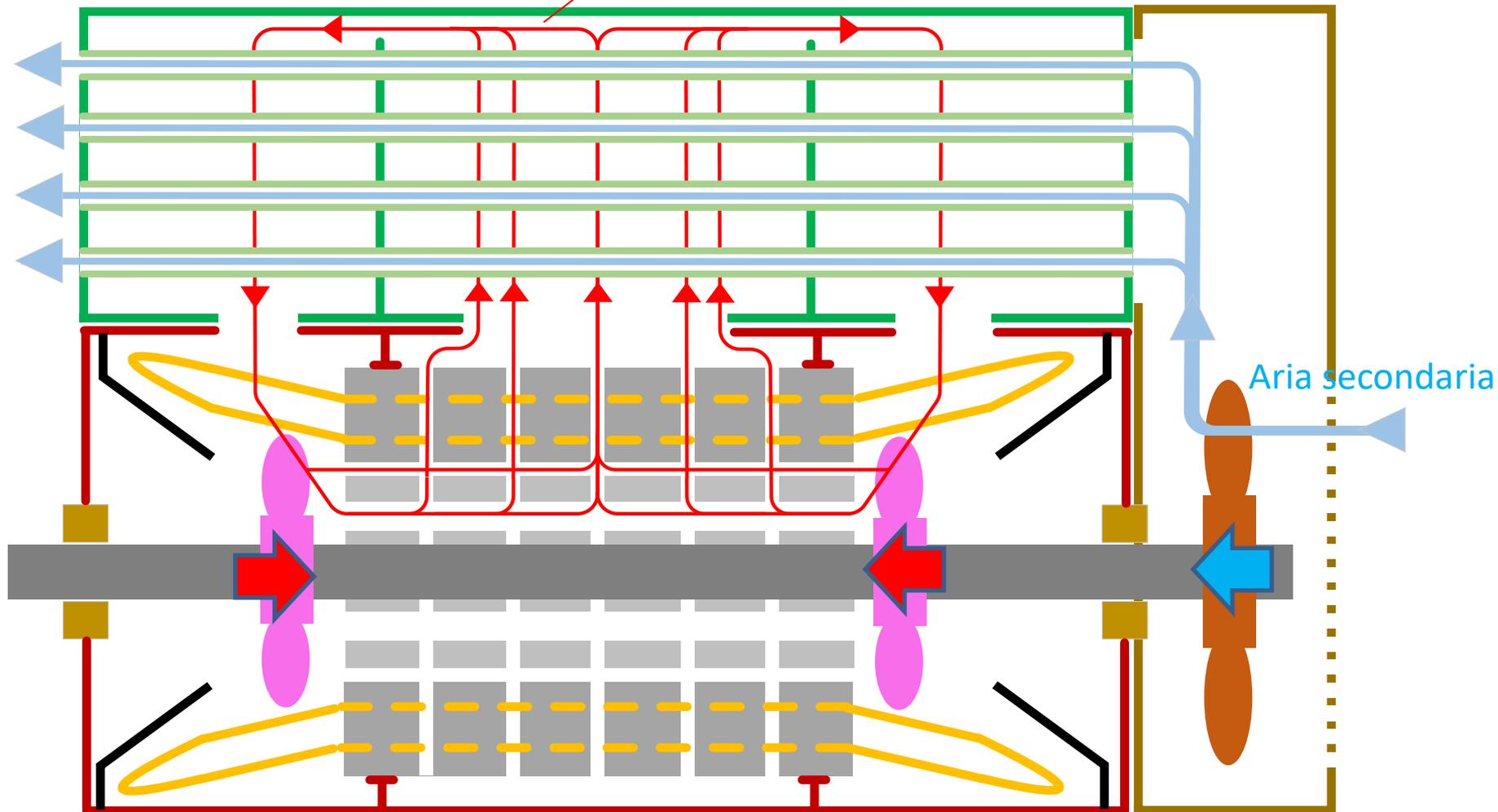
*Si nota che la ventilazione primaria è, in questo caso, di tipo «mista»
(singolo ventilatore interno)*

Il caso più frequente, per macchine di grossa taglia, è quello di ventilazione primaria di tipo «bilaterale simmetrico» (due ventilatori contrapposti)



Aria primaria

IC 611



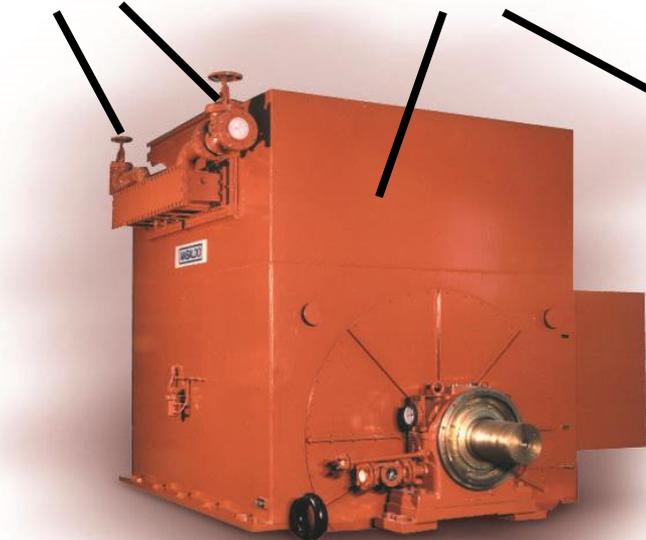
Macchina chiusa autoventilata con scambiatore aria-aria montato sulla carcassa

Ingresso e uscita acqua

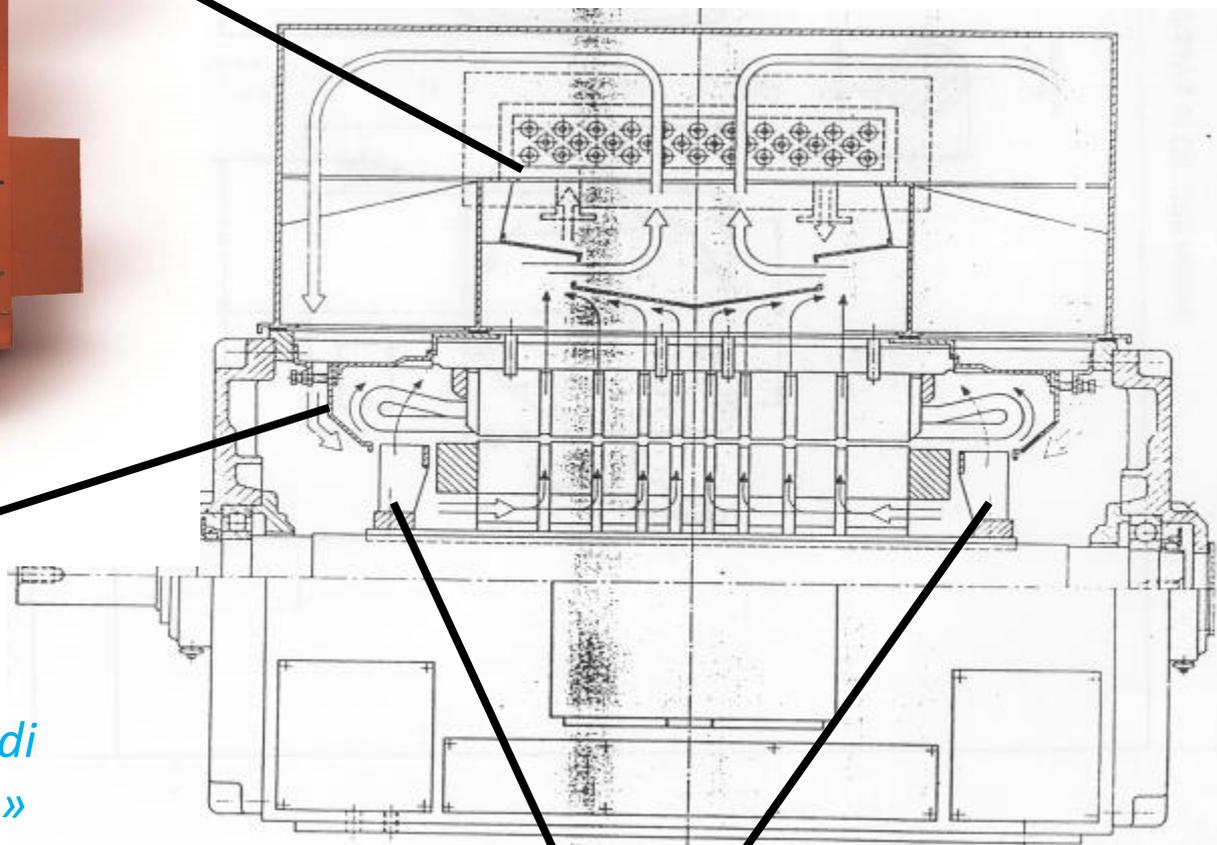
Scambiatori aria-acqua



IC 81W



Guida d'aria



Ventilatori esterni

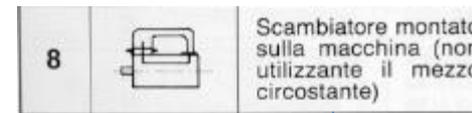
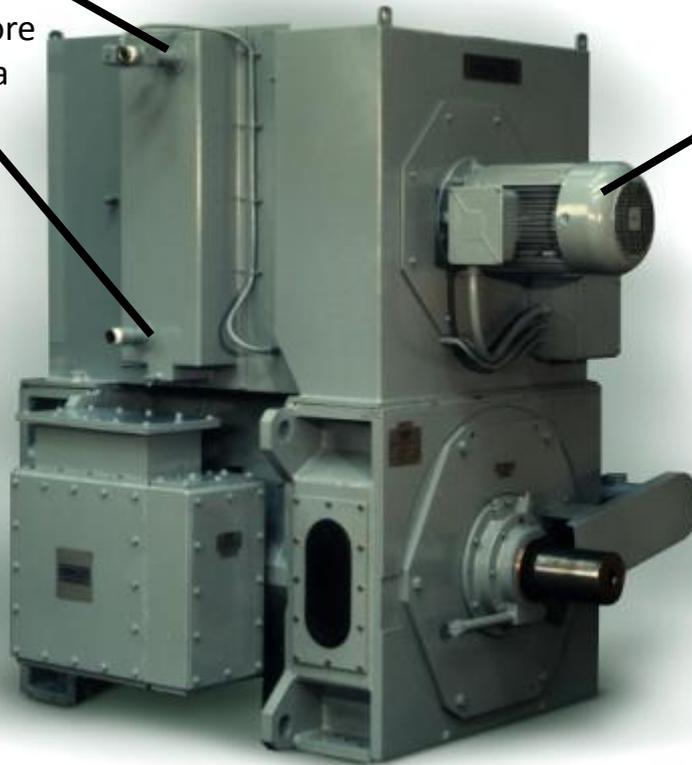
Si nota che la ventilazione primaria è, in questo caso, di tipo «bilaterale simmetrico» (due ventilatori interni)

Macchina chiusa elettroventilata con scambiatore aria-acqua montato sulla carcassa

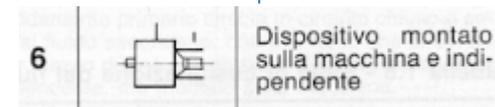
Ingresso e uscita scambiatore aria-acqua

Ventilatore elettrico

Usato in particolare per macchine a velocità variabile



IC 86W

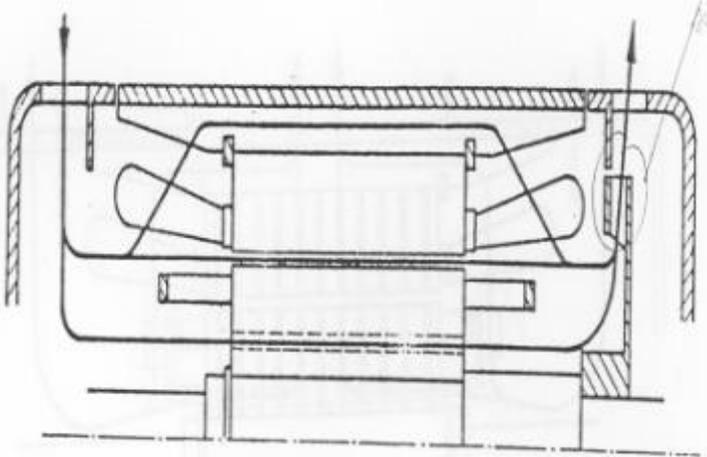


Tipi di ventilazione primaria: assiale, bilaterale simmetrica, mista

Con riferimento al moto dell'aria che lambisce le parti attive di macchina (fluido primario nel caso di macchine raffreddate a ciclo chiuso), si possono distinguere i seguenti tipi di ventilazione:

- 1) Assiale
- 2) Bilaterale simmetrica
- 3) Mista

Ventilazione assiale



L'aria di raffreddamento compie un percorso con direzione prevalentemente assiale in tutte le parti della macchina.

L'aria fresca si divide in tre flussi: nel traferro; attraverso le finestre rotoriche; attraverso le testate e sull'estradosso del pacco

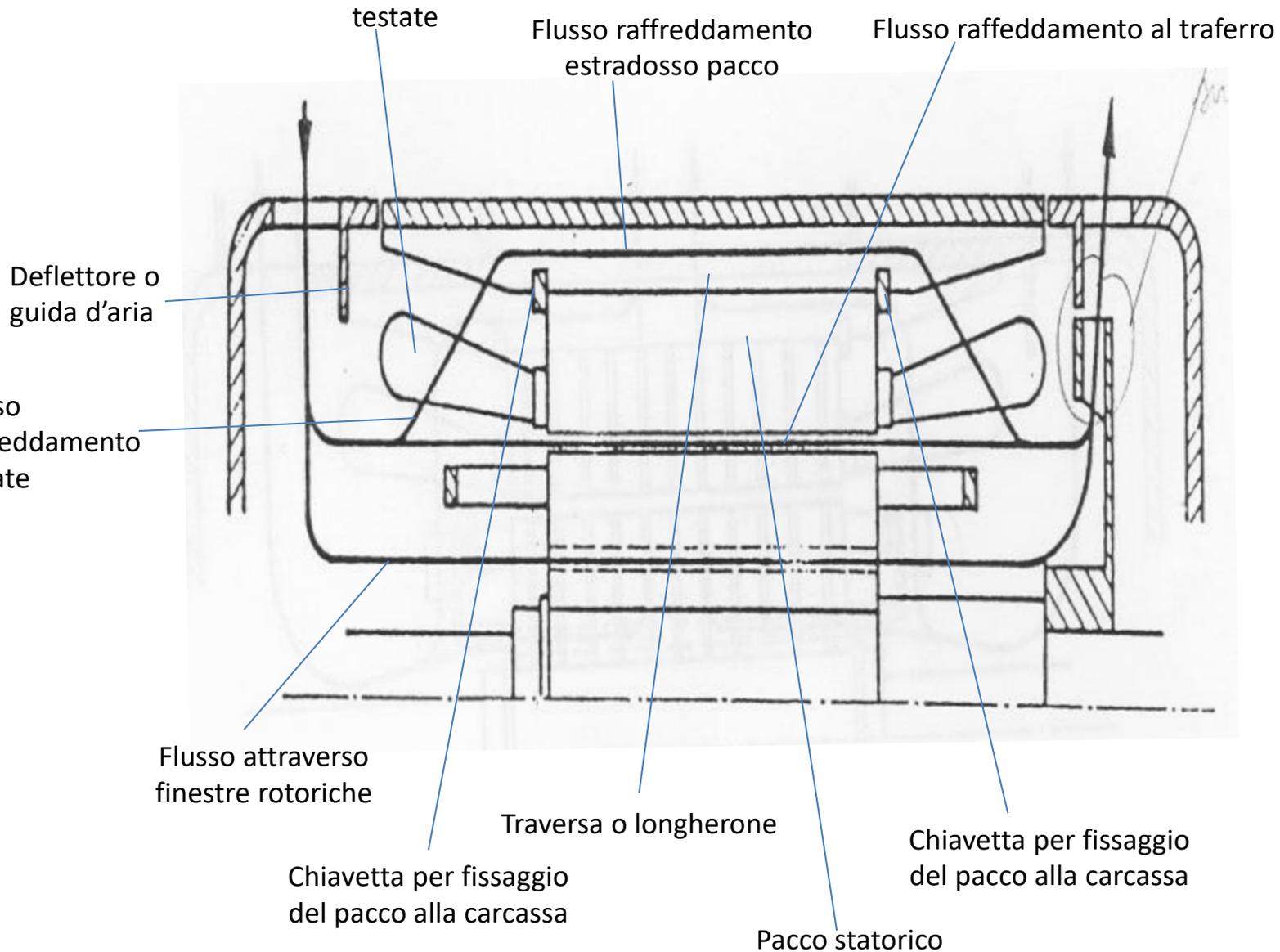
Necessita solitamente di un solo ventilatore.

Criticità fondamentali:

- a) Il pacco non è raffreddato al suo interno ma solo al traferro e sull'estradosso
- b) Un lato di macchina è ventilato con aria "fresca", l'altro con aria "calda", il che determina una non uniforme distribuzione delle temperature (in senso assiale).

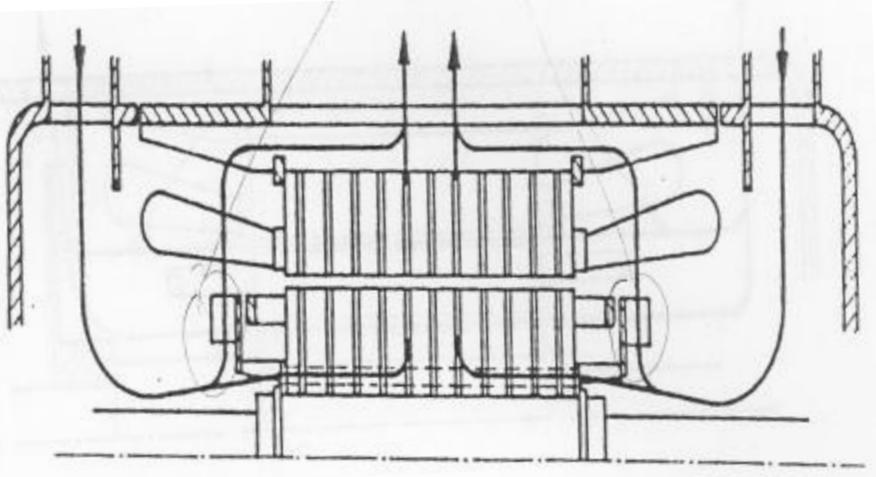
Per queste criticità la ventilazione assiale è solitamente usata solo per macchine piccole o con pacco molto corto.

Dettaglio del circuito di raffreddamento per ventilazione assiale



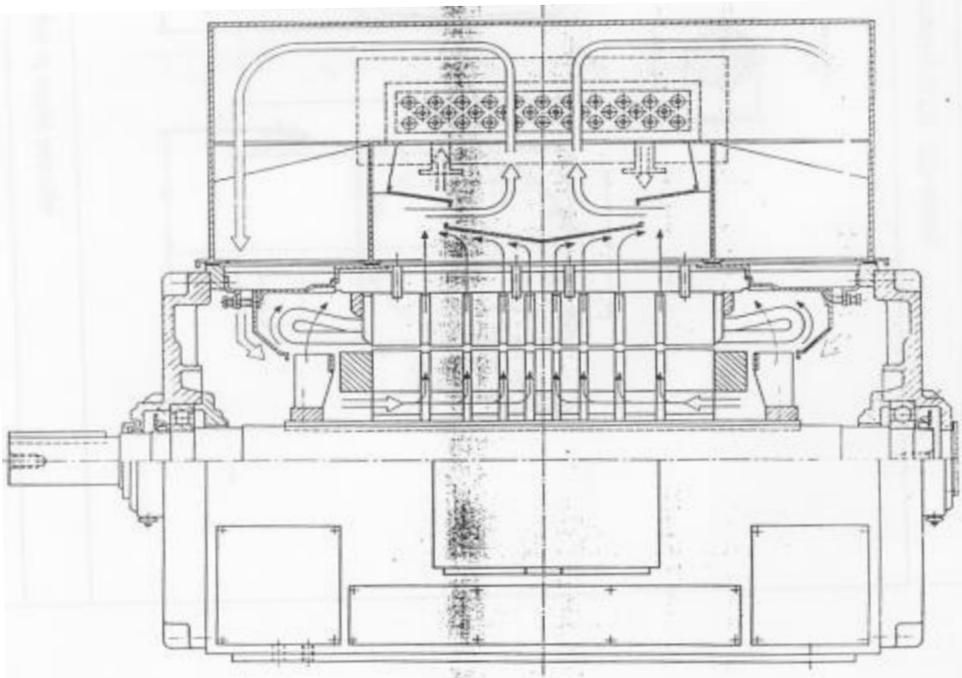
Ventilazione bilaterale simmetrica

Caso di raffreddamento a ciclo aperto



L'aria investe le parti attive da entrambi i lati con uguale velocità e portata. Quindi all'interno del pacco i due flussi d'aria, provenienti da lati opposti attraverso il traferro e le finestre di rotore, si incontrano creando una corrente in senso radiale che fluisce attraverso i canali radiali di ventilazione (di statore e rotore).

Caso di raffreddamento a ciclo chiuso

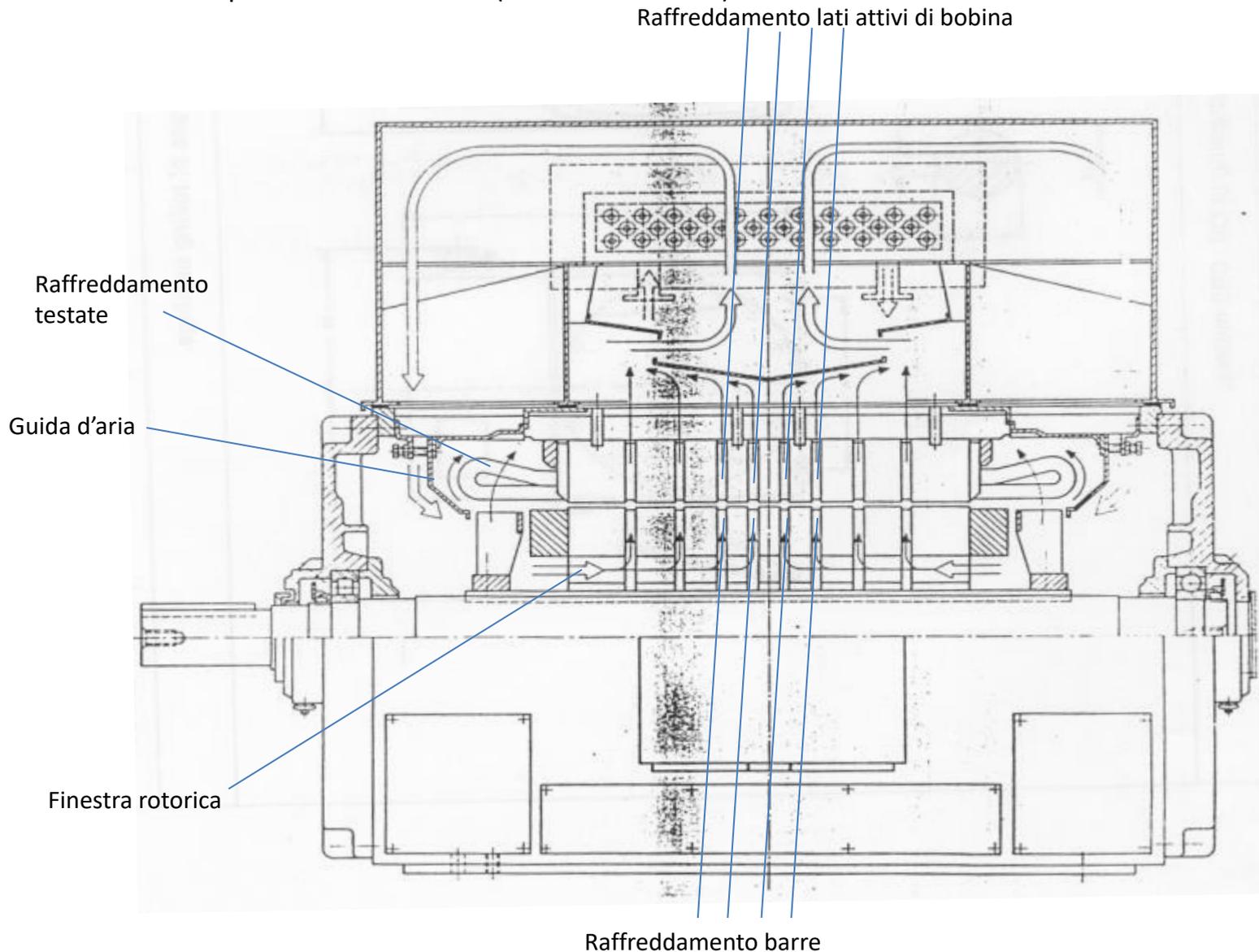


Sono necessari due ventilatori, uno per lato (per macchine autoventilate) ovvero un ugual numero di elettroventilatori sui due lati (per macchine elettroventilate).

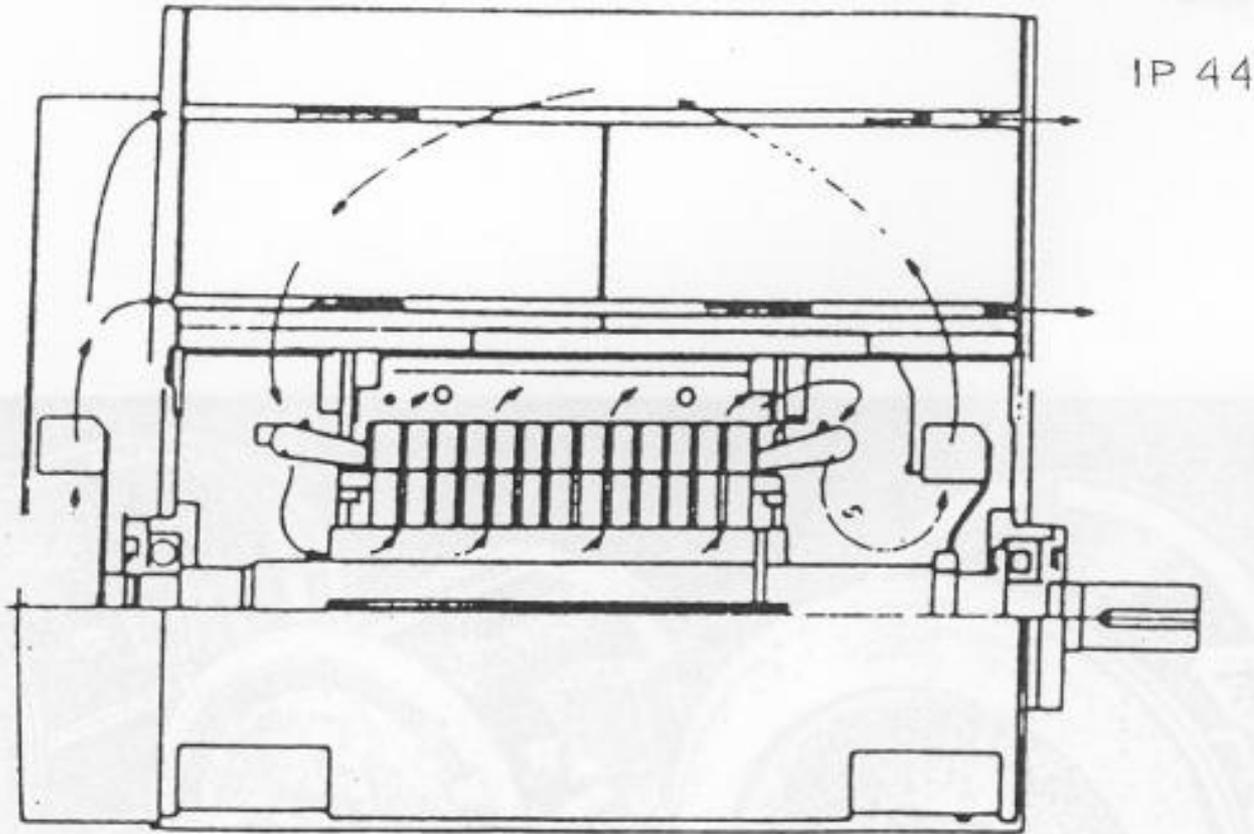
Questo tipo di ventilazione è tipicamente usata nelle macchine di potenza elevata.

Dettaglio del circuito di raffreddamento per ventilazione bilaterale simmetrica

Percorrendo i canali radiali di ventilazione di rotore e statore, l'aria lambisce direttamente le porzioni di barre e di lati attivi di bobina compresi nei canali stessi (v. slide successiva).



Dettaglio del circuito di raffreddamento per ventilazione mista

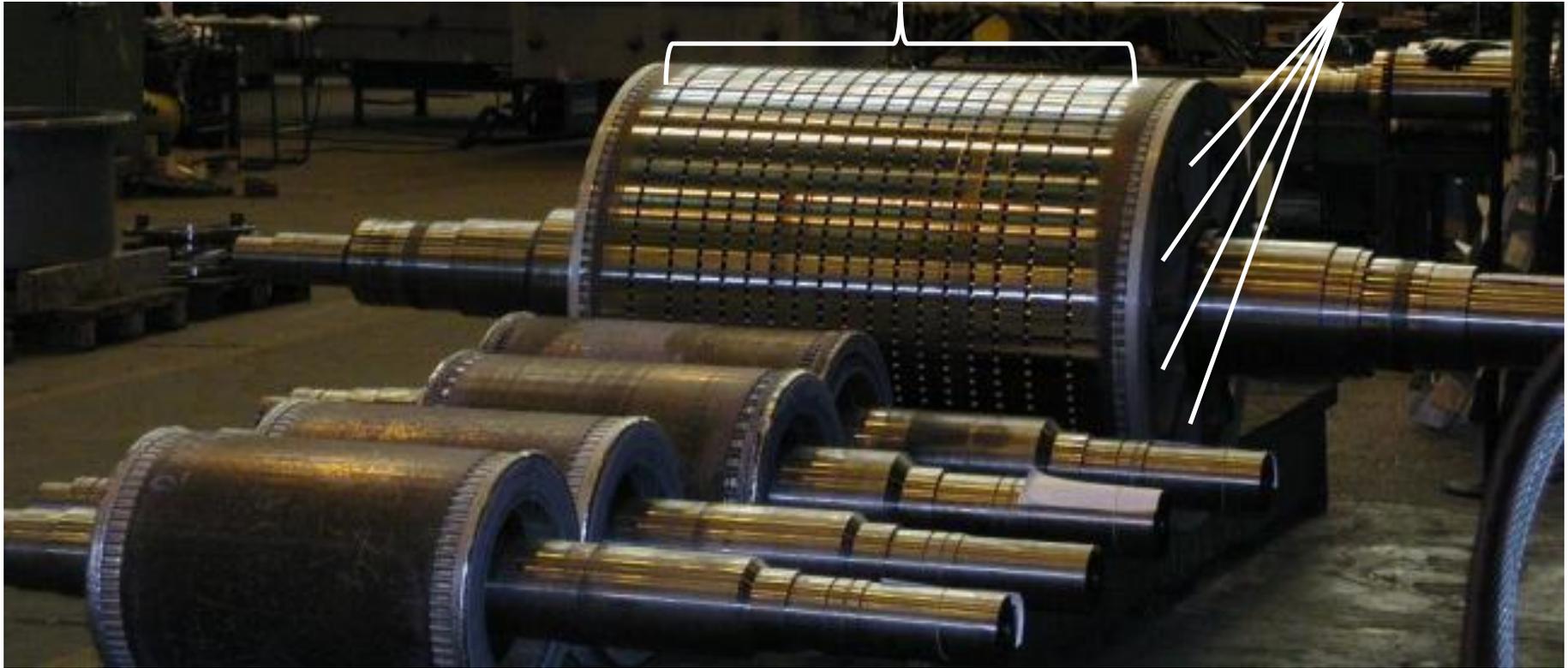


Fori di imbocco dell'aria



Canali radiali e porzioni di barre direttamente lambite dall'aria di raffreddamento

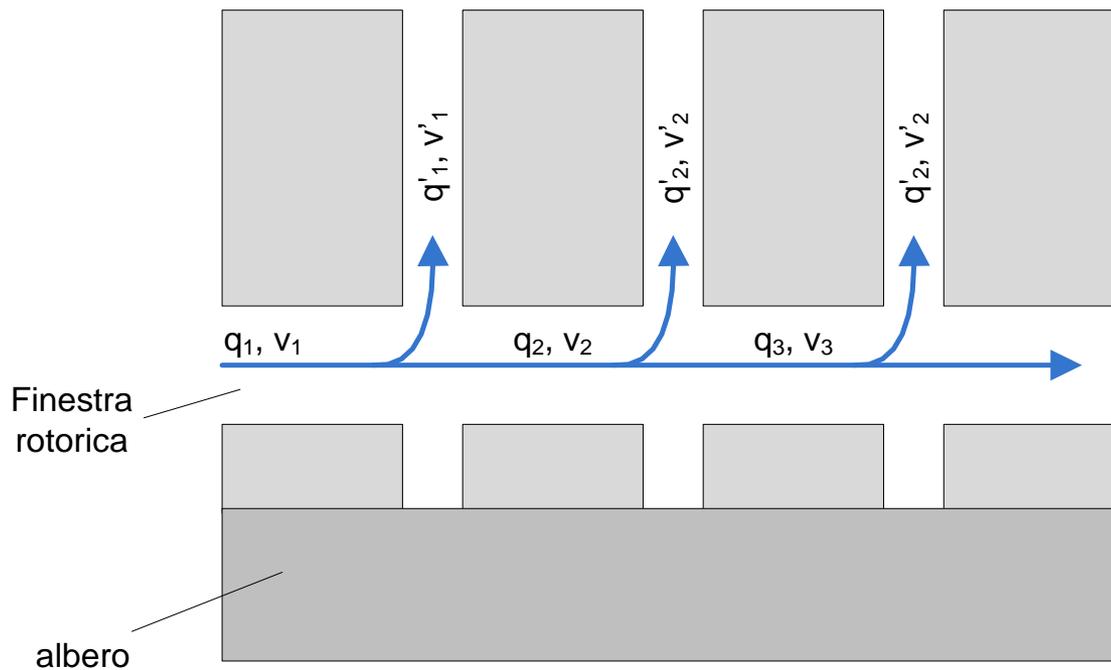
Finestre rotoriche



La zona critica è quella a centro pacco in quanto:

- 1) l'aria vi arriva già parzialmente calda avendo già asportato calore da parti attive
- 2) la velocità dell'aria tende a diminuire per riduzione della portata.

traferro _____



Infatti, dette q e v la portata e la velocità dell'aria, siano q_1 e v_1 i valori all'imbocco della finestra rotoria. Il primo canale provoca uno spillamento di portata q'_1 per cui dopo il primo canale:

$$q_2 = q_1 - q'_1$$

Essendo la sezione S della finestra costante ed essendo: $q_1 = S v_1$ $q_2 = S v_2$

si avrà: $v_2 < v_1$

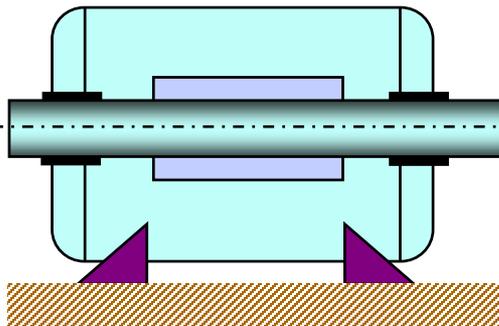
Cioè l'aria rallenta man mano che si procede verso il centro pacco. Aria più lenta nei canali implica minor asporto di calore (diminuisce il coefficiente di convezione). A ciò si tenta di ovviare aumentando la densità dei canali verso il centro del pacco.

MOUNTING ARRANGEMENT (IM)

Il “mounting arrangement” o forma costruttiva definisce essenzialmente le interfacce meccaniche tra la macchina e l'esterno, cioè in particolare:

- Il tipo di sopporti per l'albero (a scudo o a cavalletto)
- La posizione dell'asse di rotazione (asse orizzontale, verticale, inclinato)
- Tipo di estremità d'albero (singola/doppia, libera/flangiata)
- Tipo di ancoraggio alla struttura portante (piedi, piedi sollevati, basamento)

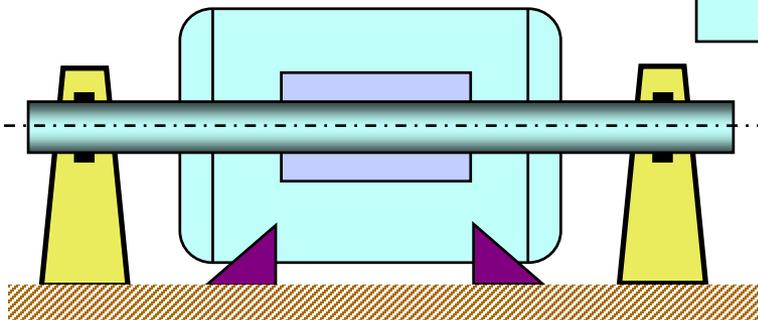
POSIZIONE ASSE E SOPPORTI



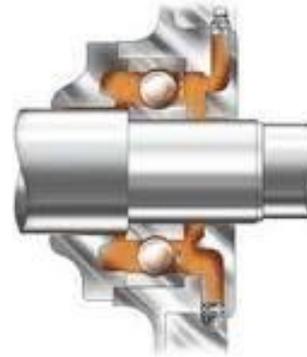
A) Asse orizzontale,
sopporti a scudo.



B) Asse orizzontale,
sopporti a cavalletto.



Cuscinetti a rulli o a sfere (per sopporti a scudo e piccole potenze)

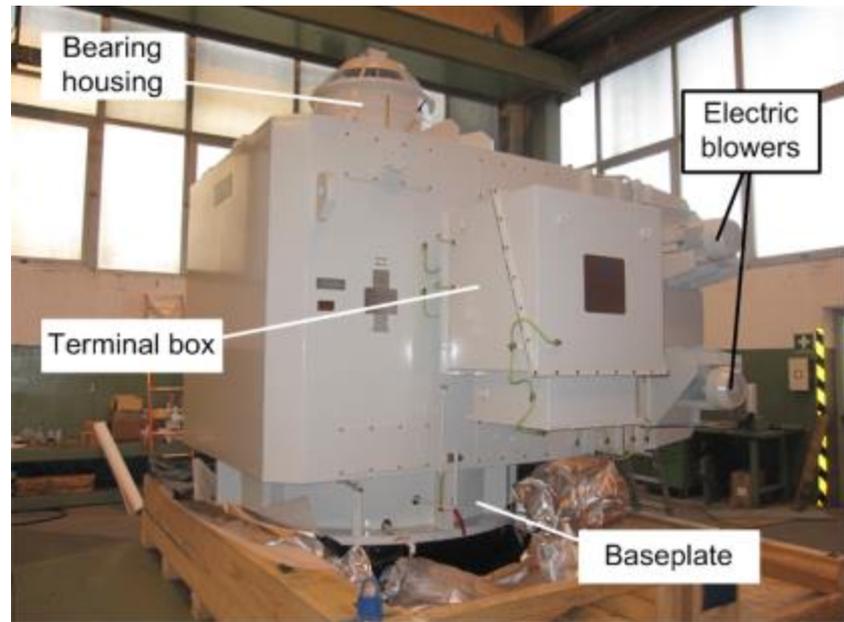
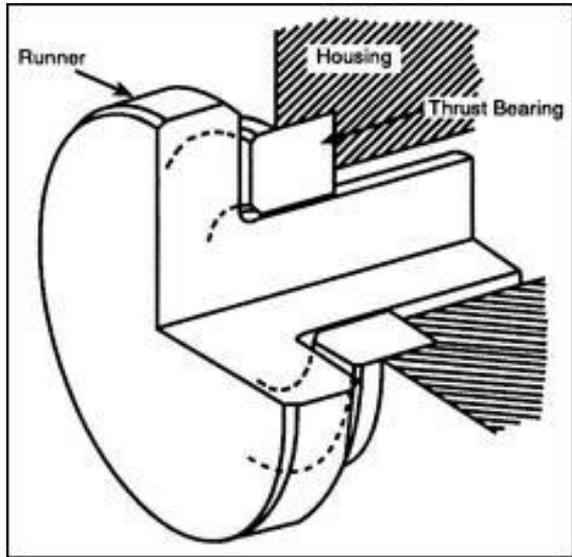
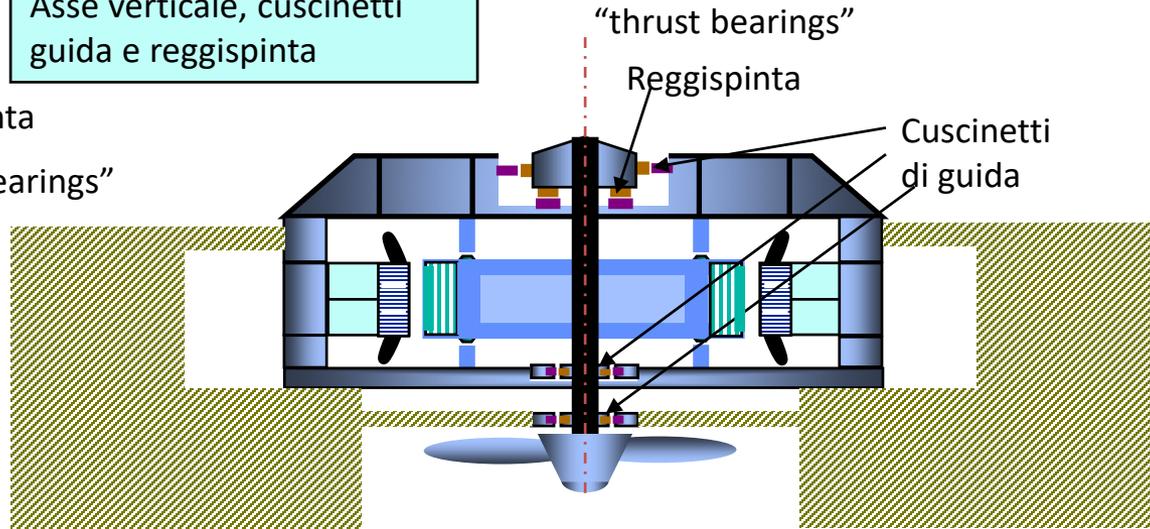
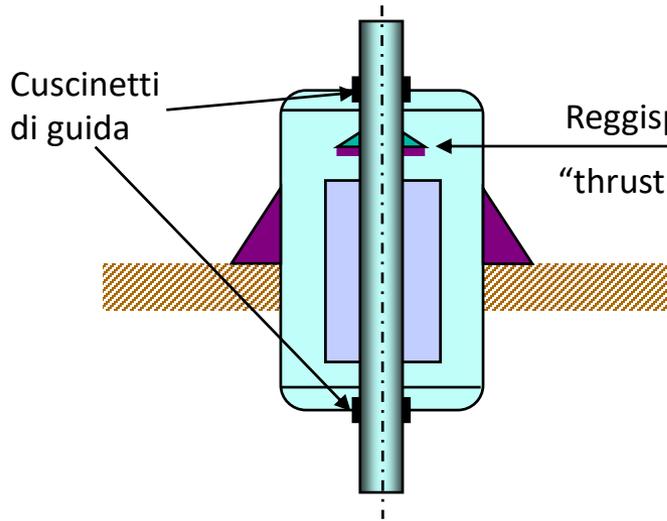


Cuscinetti a strisciamento in bagno d'olio per alte potenze (anche per sopporti a cavalletto)



POSIZIONE ASSE E SOPPORTI

Asse verticale, cuscinetti guida e reggispinta



Motore asincrono ad asse verticale con scudo flangiato e cuscinetto reggispinta

ESTREMITA' D'ALBERO



Asincrono con estremità
d'albero flangiata

Accoppiamento
mediante giunto
flangiato



Estremità d'albero libera



SCUDI

Carcasse con scudi flangiati



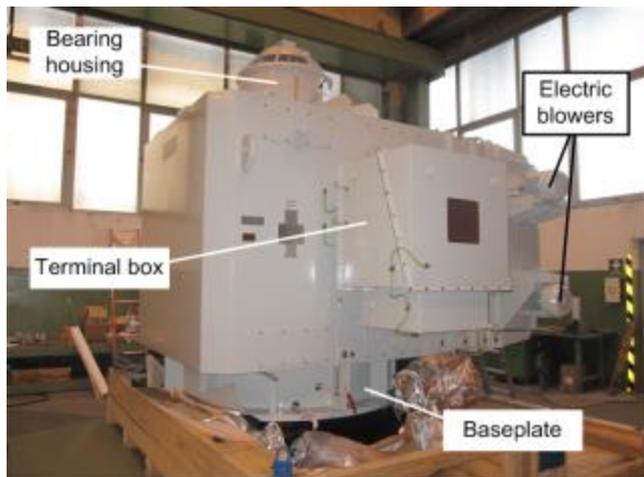
Carcassa con scudi non flangiati

SISTEMI DI FISSAGGIO ALLA STRUTTURA PORTANTE

Mediante piedi



Mediante basamento



Mediante carcassa flangiata

CLASSIFICAZIONE IN BASE ALLA NORMATIVA

Le forme costruttive delle macchine elettriche rotanti sono definite dalla Norma:

CEI 2-14/97 - IEC 34 / 7 (IM CODE I & II)

(Classificazione delle forme costruttive e dei tipi di installazione)

IM CODE I

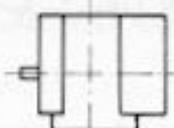
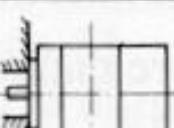
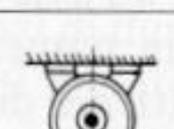
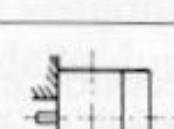
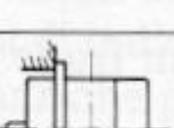
Il Codice IM-I° riguarda unicamente le macchine con supporti a scudo e con una sola estremità di albero

IM	B/V	Numero
----	-----	--------

B=asse orizzontale; **V**=verticale

Il significato del “Numero” è illustrato dalle tabelle seguenti.

Tab. 1.10 - Sigle di designazione delle forme costruttive e del tipo di installazione dei motori ad asse orizzontale.

Sigla	Figura	Caratteristiche	Generalità relative alla costruzione	Installazione
B 3		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera	—	Montata su una struttura di base mediante piedi
B 35		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera	Con scudo lato comando flangiato; flangia con fori passanti	Montata su una struttura di base mediante piedi e fissata ulteriormente a flangia
B 34		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera	Scudo lato comando con superficie frontale lavorata; fori filettati	Montata su una struttura di base mediante piedi e fissata ulteriormente a flangia
B 8		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera	Come B 3, ma con supporti a scudo ruotati di 180° (caso di supporti a strisciamento)	Montata a soffitto
B 9		1 supporto a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera	Come B 5 o B 14 senza supporto e scudo e senza cuscinetto dal lato comando	Fissaggio frontale della carcassa dal lato comando
B 10		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera	Carcassa flangiata lato comando; flangia speciale	Fissata frontalmente mediante flangia dal lato comando

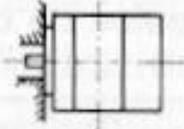
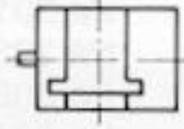
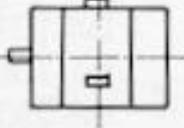
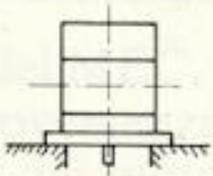
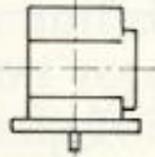
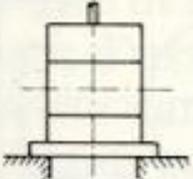
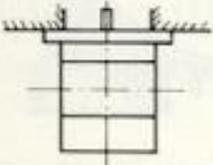
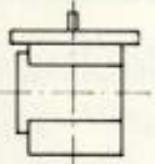
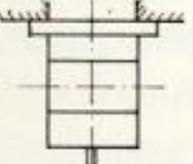
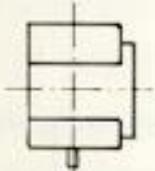
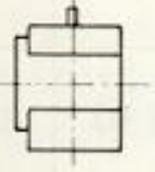
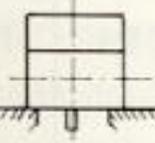
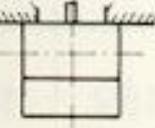
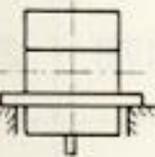
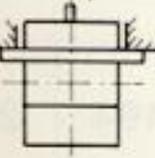
B 14		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera	Scudo lato comando con superficie frontale lavorata; fori filettati	Fissata mediante flangia
B 20		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera	—	Montata all'interno di una struttura di base
B 30		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera	3 o 4 protuberanze su 1 supporto o su 2 supporti o sulla carcassa	Montata mediante protuberanze
B 5		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera	Scudo lato comando flangiato; flangia con fori passanti	Fissata mediante flangia
B 6		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera	Come B 3, ma con supporti a scudo ruotati di 90° (caso di supporti a strisciamento)	Montata a parte. Piedi a sinistra visti dal lato comando
B 7		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera	Come B 3, ma con supporti a scudo ruotati di 90° (caso di supporti a strisciamento)	Montata a parete. Piedi a destra visti dal lato comando

Tabella 1.11 - Sigle di designazione delle forme costruttive e del tipo di installazione dei motori ad asse verticale.

Sigla	Figura	Caratteristiche	Generalità relative alla costruzione	Installazione
V 1		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso il basso	Scudo lato comando flangiato; flangia con fori passanti	Fissata mediante flangia in basso
V 15		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera verso il basso	Scudo lato comando flangiato o con superficie frontale lavorata; fori passanti o filettati	Montata a parete e fissata ulteriormente mediante flangia in basso
V 2		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso l'alto	Scudo lato comando flangiato; flangia con fori passanti	Fissata mediante flangia in basso
V 3		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso l'alto	Scudo lato comando flangiato; flangia con fori passanti	Fissata mediante flangia in alto
V 36		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera verso l'alto	Scudo lato comando flangiato; flangia con fori passanti	Montata a parete o su una struttura di base e fissata ulteriormente mediante flangia in alto
V 4		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso il basso	Scudo lato opposto comando flangiato; flangia con fori passanti	Fissata mediante flangia in alto

V 5		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera verso il basso	Come B 3	Montata a parete o su una struttura di base
V 6		2 supporti a scudo carcassa con piedi albero con estremità libera verso l'alto	Come B 3	Montata a parete o su una struttura di base
V 8		1 supporto a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso il basso	Come V 1 o V 18 ma senza supporto a scudo e senza cuscinetto dal lato comando	Fissaggio frontale della carcassa in basso
V 9		1 supporto a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso l'alto	Come V 3 o V 19 ma senza supporto a scudo e senza cuscinetto dal lato comando	Fissaggio frontale della carcassa in alto
V 10		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso il basso	Carcassa flangiata lato comando; flangia con fori passanti	Fissata frontalmente mediante flangia in basso
V 14		2 supporti a scudo carcassa senza piedi albero con estremità libera verso l'alto	Carcassa flangiata lato comando; flangia con fori passanti	Fissata frontalmente mediante flangia in alto

IM CODE II: IM $X_1X_2X_3X_4$

IM (international mounting arrangement) Sigla fissa.	Sigla internazionale di forma costruttiva
Primo numero (X_1)	Categoria della forma costruttiva (9 cat.)
Secondo numero e Terzo numero (X_2, X_3)	Disposizione di montaggio (cuscinetti, asse, piedi, ecc)
Quarto numero (X_4)	Tipo di estremità d'albero

- **Ad esempio, la sigla IM 7535 significa:**
 - **macchina ad asse orizzontale;**
 - **con supporti a cavalletto, due cuscinetti, con piedi sollevati, su basamento su cui poggiano anche i supporti;**
 - **con estremità d'albero flangiata.**

Tabella 1.12 - Forme costruttive dei motori. Relazione tra le sigle del Codice I e quelle del Codice II.

Codice I	Codice II	Codice I	Codice II
IM B 3	IM 1001	IM V 1	IM 3011
IM B 5	IM 3001	IM V 2	IM 3231
IM B 6	IM 1051	IM V 3	IM 3031
IM B 7	IM 1061	IM V 4	IM 3211
IM B 8	IM 1071	IM V 5	IM 1011
IM B 9	IM 9101	IM V 6	IM 1031
IM B 10	IM 4001	IM V 8	IM 9111
IM B 14	IM 3601	IM V 9	IM 9131
IM B 15	IM 1201	IM V 10	IM 4011
IM B 20	IM 1101	IM V 14	IM 4031
IM B 30	IM 9201	IM V 15	IM 2011
IM B 34	IM 2101	IM V 16	IM 4131
IM B 35	IM 2001	IM V 18	IM 3611
		IM V 19	IM 3631
		IM V 21	IM 3115
		IM V 30	IM 9211
		IM V 31	IM 9231
		IM V 36	IM 2031

TIPO DI SERVIZIO (S)

Le macchine vengono inoltre caratterizzate in base al tipo di servizio (S...) secondo i codici già visti nella parte introduttiva:

S1 - Servizio continuo

S2 - Servizio di durata limitata

S3 - Servizio intermittente

S4 - Servizio intermittente periodico con avviamento che influenza il riscaldamento della macchina

S5 - Servizio intermittente periodico con avviamento e frenatura che influenza il riscaldamento della macchina

S6 - Servizio ininterrotto con carico intermittente

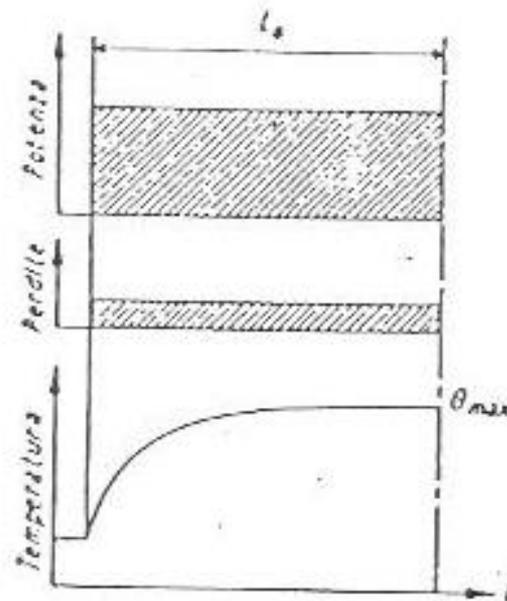
S7 - Servizio ininterrotto con avviamento e frenatura che influenzano il riscaldamento della macchina

S8 - Servizio ininterrotto con cambiamento periodico della velocità

TIPO DI SERVIZIO

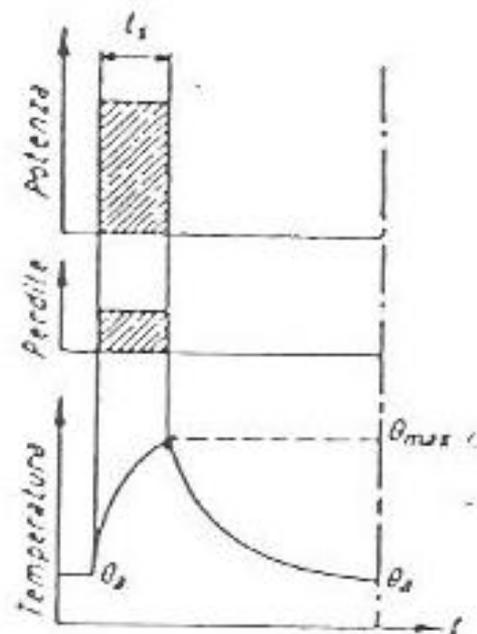
Il tipo di servizio definisce il livello di continuità / discontinuità con cui una macchina è chiamata a funzionare. Si indica con la lettera "S" seguita da una cifra.

SERVIZIO CONTINUO (S1)



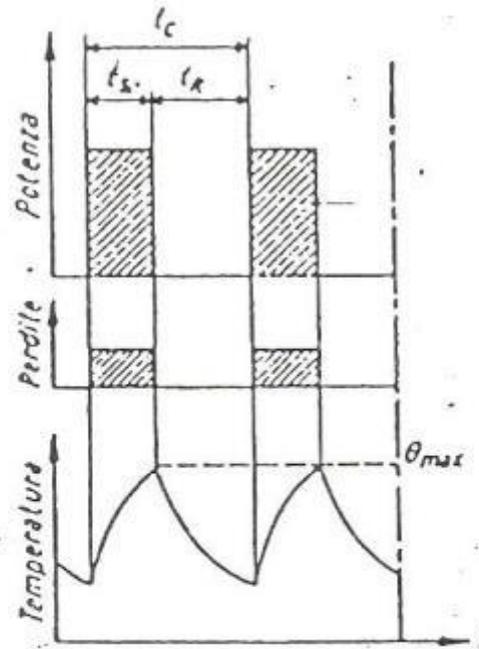
Funzionamento a carico costante di durata almeno sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico.

SERVIZIO DI DURATA LIMITATA (S2)



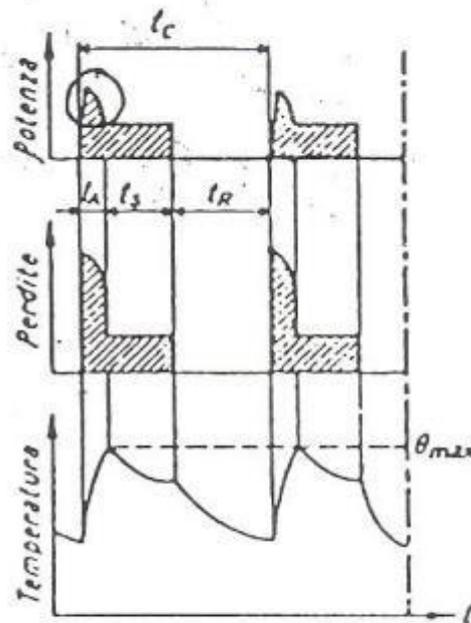
Funzionamento a carico costante per una durata determinata, minore a quella necessaria per raggiungere l'equilibrio termico, seguito da un tempo di riposo, di durata sufficiente, a ristabilire nella macchina la temperatura ambiente o del mezzo refrigerante. I valori raccomandati per il servizio di durata limitata sono: 10, 30, 60 e 90 minuti.

SERVIZIO INTERMITTENTE PERIODICO (S3)



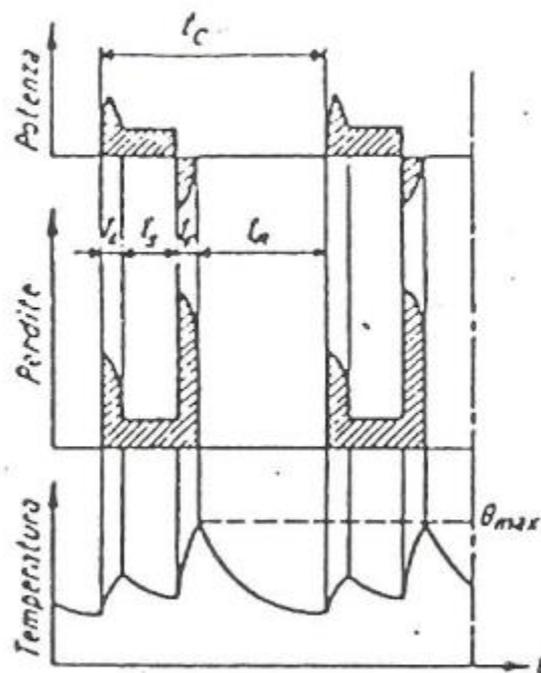
Funzionamento secondo una serie di cicli identici, ciascuno comprendente un tempo di funzionamento a carico costante e un tempo di riposo, nessuno dei quali di durata sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico. Inoltre in questo servizio le punte di corrente all'avviamento non devono influenzare il riscaldamento della macchina in modo sensibile. I valori raccomandati del **rapporto di intermittenza** sono: 15, 25, 40 e 60%.

SERVIZIO INTERMITTENTE PERIODICO CON AVVIAMENTI CHE INFLUENZANO IL RISCALDAMENTO DELLA MACCHINA (S4)



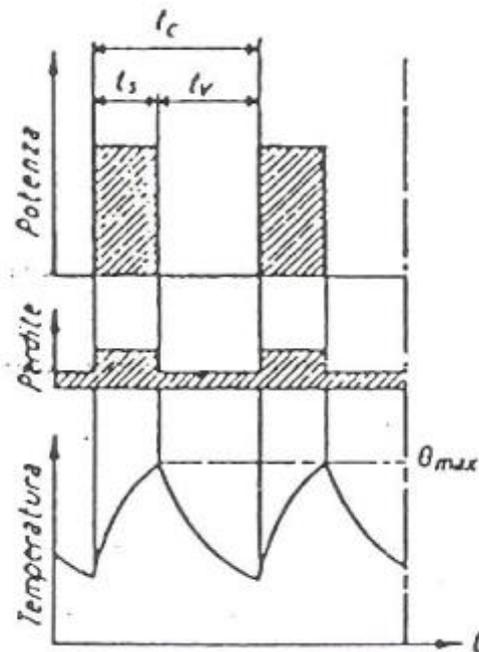
Funzionamento secondo una serie di cicli identici, ciascuno comprendente un tempo di avviamento, uno di funzionamento a carico costante e uno di riposo, nessuno dei quali di durata sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico (l'arresto della macchina è ottenuto per rallentamento naturale o per frenatura meccanica senza provocare riscaldamenti supplementari negli avvolgimenti).

SERVIZIO INTERMITTENTE PERIODICO CON AVVIAMENTI E FRENATURE CHE INFLUENZANO IL RISCALDAMENTO DELLA MACCHINA (S5)



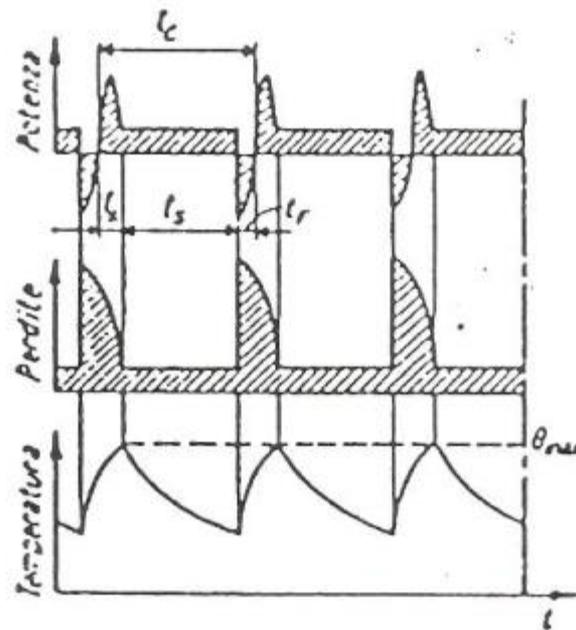
Funzionamento come S4, salvo la frenatura che viene eseguita con mezzi elettrici (es. per controcorrente).

SERVIZIO ININTERROTTO PERIODICO CON CARICO INTERMITTENTE (S6)



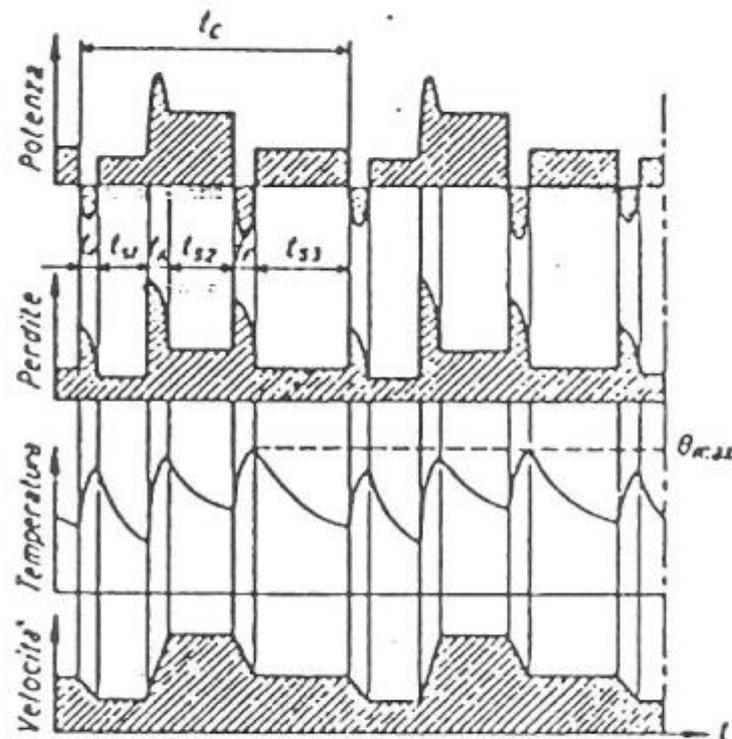
Funzionamento secondo una serie di cicli identici, ciascuno comprendente un tempo di funzionamento a carico costante e un tempo di funzionamento a vuoto, ambedue di durata non sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico in un ciclo. I valori raccomandati del rapporto di intermittenza sono: 15, 25, 40 e 60%.

SERVIZIO ININTERROTTO PERIODICO CON AVVIAMENTI E FRENATURE CHE INFLUENZANO IL RISCALDAMENTO DELLA MACCHINA (S7)



Funzionamento secondo una serie di cicli identici, ciascuno comprendente un tempo di avviamento, uno di funzionamento a carico costante e uno di frenatura elettrica, e di durata non sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico.

SERVIZIO ININTERROTTO PERIODICO CON CAMBIAMENTO PERIODICO DELLA VELOCITÀ' (S8)



Funzionamento secondo una serie di cicli identici, ciascuno comprendente un tempo di funzionamento a carico costante con determinata velocità di rotazione seguito immediatamente da un tempo di funzionamento ad un altro carico costante con velocità di rotazione differente (realizzata p.es. con cambiamento di polarità), e di durata non sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico. Non esiste tempo di riposo poiché la macchina resta praticamente sempre in tensione.

TECNOLOGIE DI STATORE

Lo statore della macchina asincrona consiste principalmente di:

- Parte attiva costituita dal pacco laminato e dagli avvolgimenti statorici
- Strutture meccaniche ausiliarie (piastre di pressione, tiranti, distanziatori, biette)

La costruzione dello statore prevede:

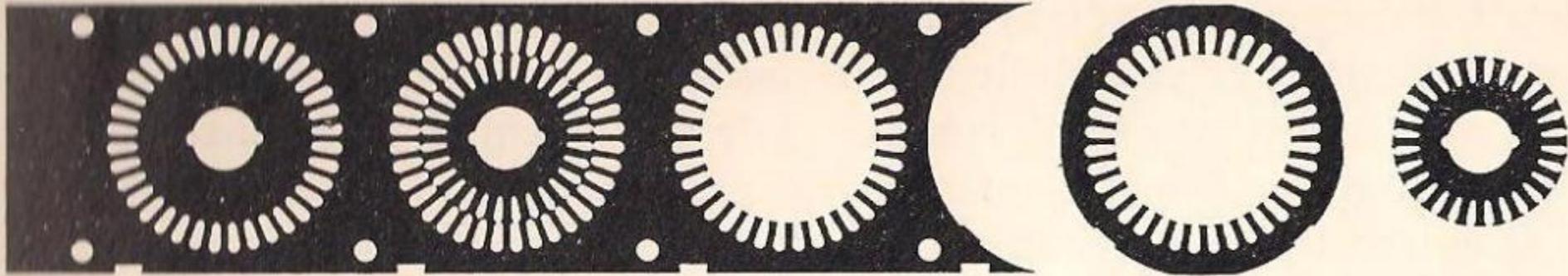
- La realizzazione del pacco laminato
- L'avvolgimento del pacco statore (statore avvolto)
- L'impregnazione dello statore avvolto
- L'inserimento dello statore in carcassa

REALIZZAZIONE DEL PACCO LAMINATO

Caratteristiche tipiche del lamierino magnetico per la costruzione del pacco statore:

- Tenore di silicio da 1.5 – 3.5 %
- Sempre lamierino isotropo (non cristalli orientati)
- Spessore : 0.35 mm - 0.5 mm - 0.65 mm
- Cifra di perdita nominale: 1.3 W/kg – 1.7 W/kg - 2.3 W/kg
- Isolato su una sola faccia con vernice isolante, per aumentare il coefficiente di stipamento (0.92 – 0.93)

La lavorazione del lamierino (fornito in nastri con larghezza standard di 900 mm) prevede, come detto nella parte introduttiva, operazioni di tranciatura e punzonatura.



Punzonatura cave statore,
tranciatura foro albero

Punzonatura
cave rotore

Tranciatura
circonferenze di
traferro

Tranciatura
circonferenza
estera statore

Lamierino
rotore finito



Esempio di macchina punzonatrice e tranciatrice a controllo numerico

Possono dover essere realizzate anche finestre di ventilazione rotoriche.

La realizzazione di ogni nuova forma di cava richiede l'approvvigionamento di un nuovo punzone.

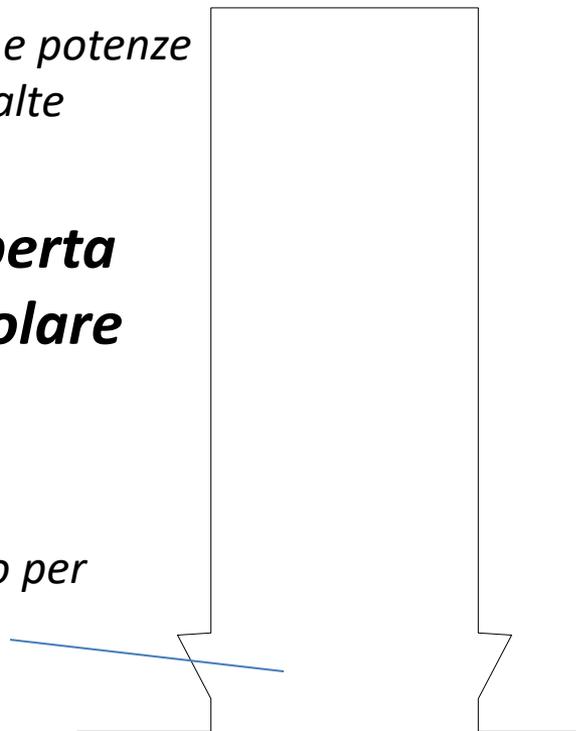
La realizzazione di ogni nuova circonferenza di statore o rotore (esterna, al traferro, all'albero) richiede la realizzazione di un nuovo stampo (operazione "artigianale" quindi costosa).

FORMA DELLE CAVE DI STATORE

Tipico per MT e potenze medio-alte

Cava aperta rettangolare

Alloggiamento per la bietta



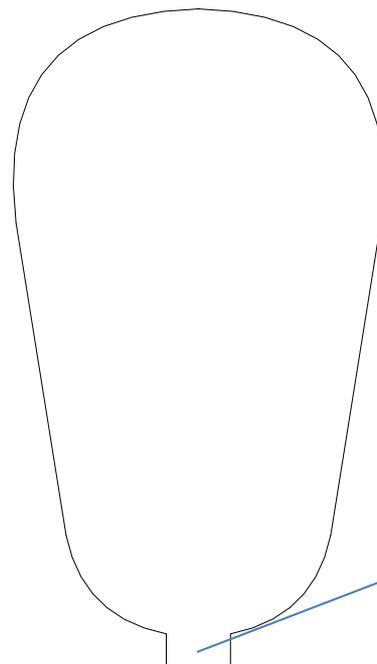
Per avvolgimento in piattina



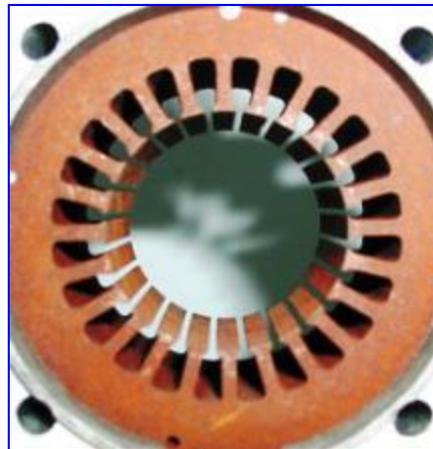
Tipico per BT e potenze medio-basse

Cava semichiusa trapezia

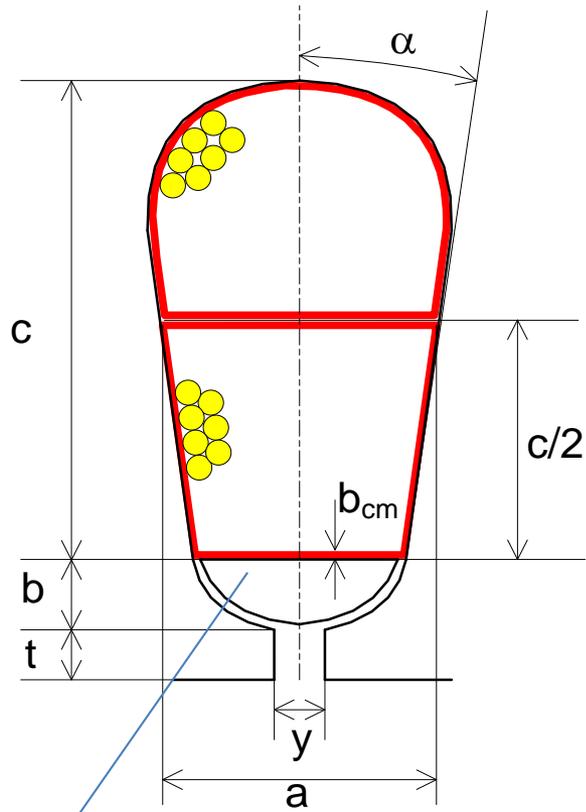
Intaglio per inserimento del filo



Per avvolgimento in filo

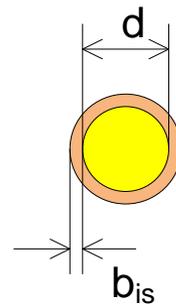


Cava trapezia semichiusa

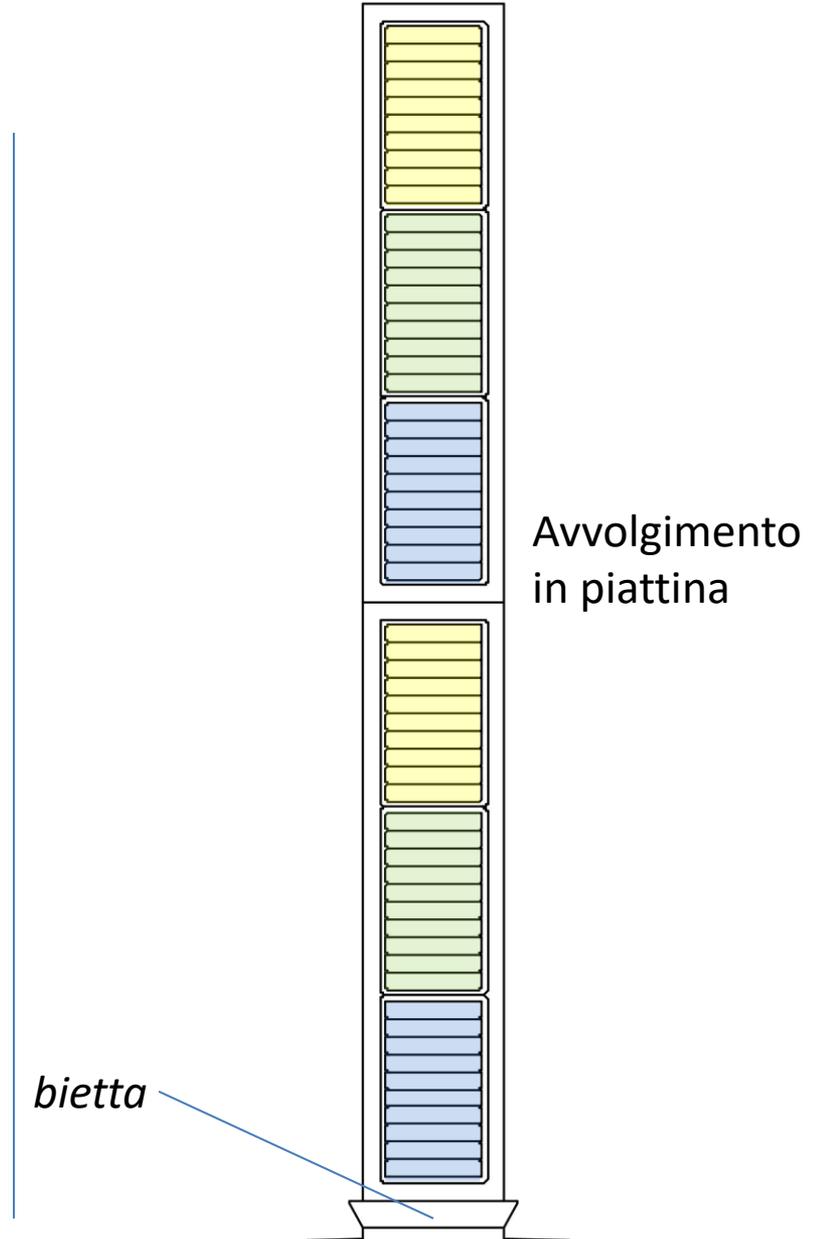


bietta

Avvolgimento in filo

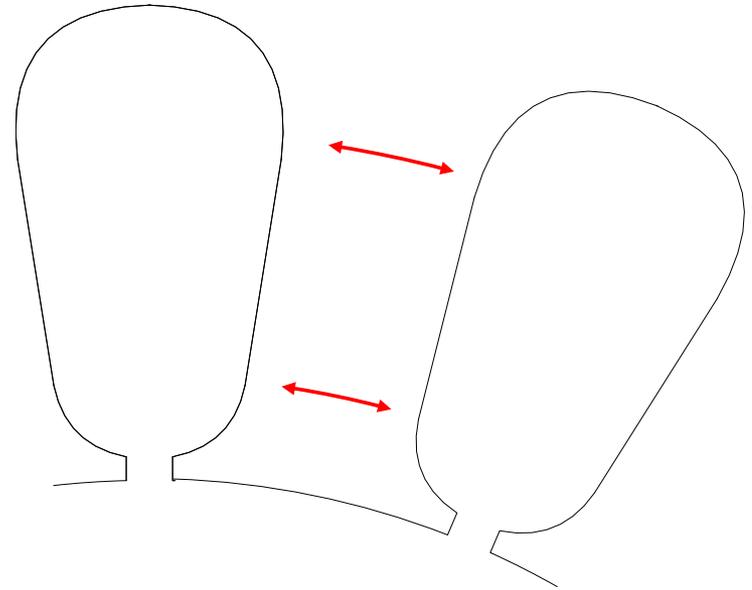
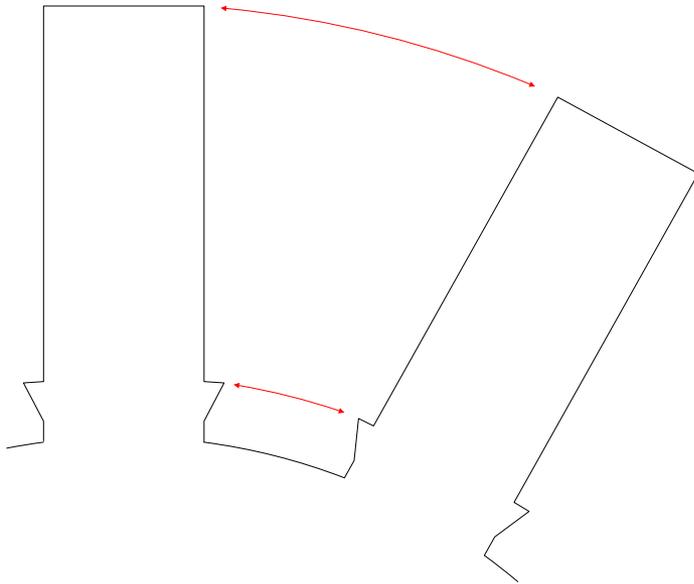


Cava rettangolare aperta



Avvolgimento
in piattina

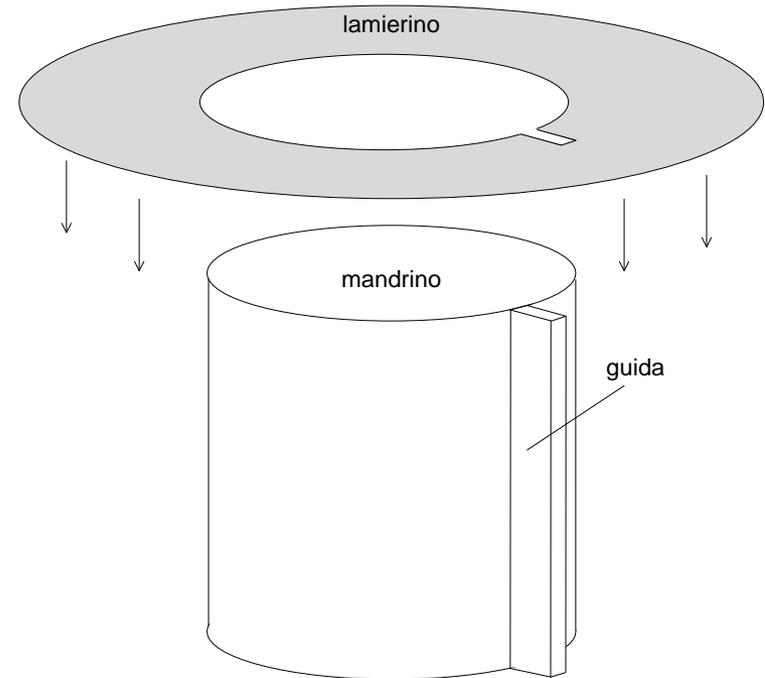
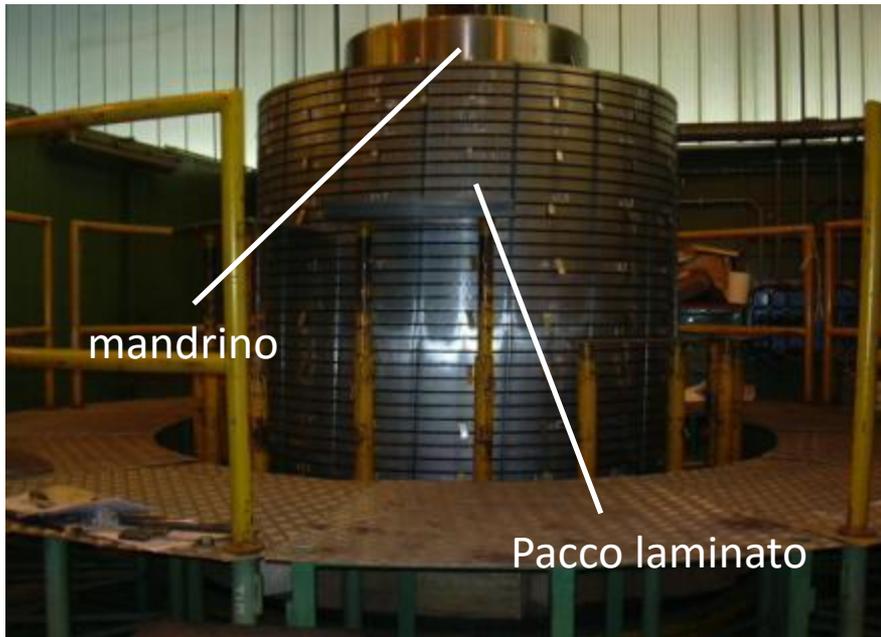
bietta



Nel caso di cava rettangolare, si ha necessariamente una sezione del dente di statore variabile (rastremato sul lato del traferro). Questo comporta una maggiore saturazione del dente nelle vicinanze del traferro e una progressiva diminuzione dell'induzione magnetica man mano che ci si sposta verso il fondo cava.

L'inclinazione dei fianchi della cava trapezia usata nell'avvolgimento in filo, invece, è determinata proprio dalla opportunità di avere una sezione di dente uniforme, cioè un uniforme livello di saturazione del dente stesso.

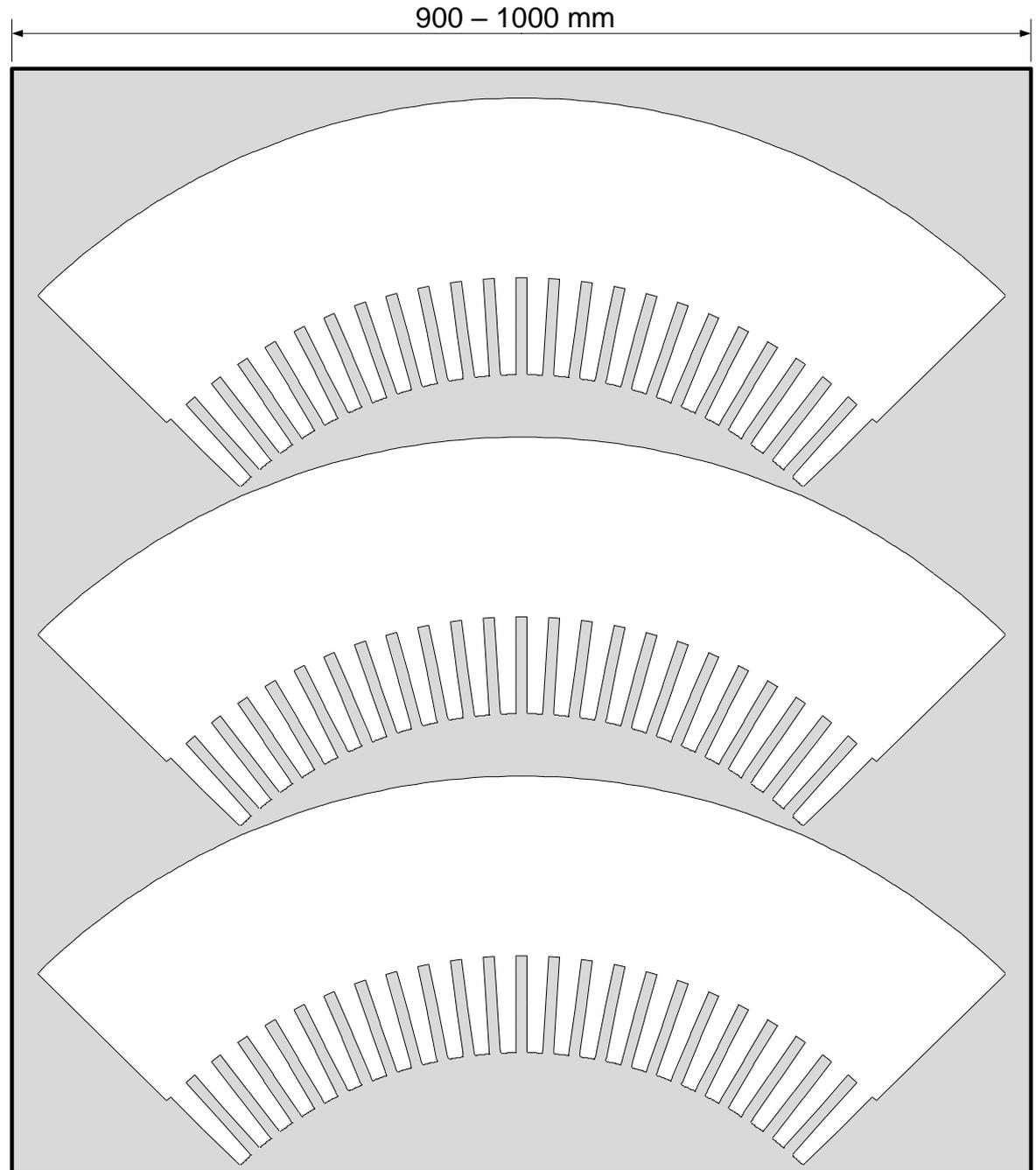
Una volta tranciati e punzonati, i lamierini vengono impilati per formare il pacco laminato. Tale operazione prende il nome di impaccaggio e fa uso di particolari mandrini che consentono il posizionamento corretto dei lamierini.



E' fondamentale che l'impaccaggio avvenga allineando esattamente le cave in modo che le pareti di queste non abbiano irregolarità. Si usano allo scopo guide posizionate assialmente sui mandrini. L'uso di guide inclinate consente la realizzazione di pacchi a cave inclinate.

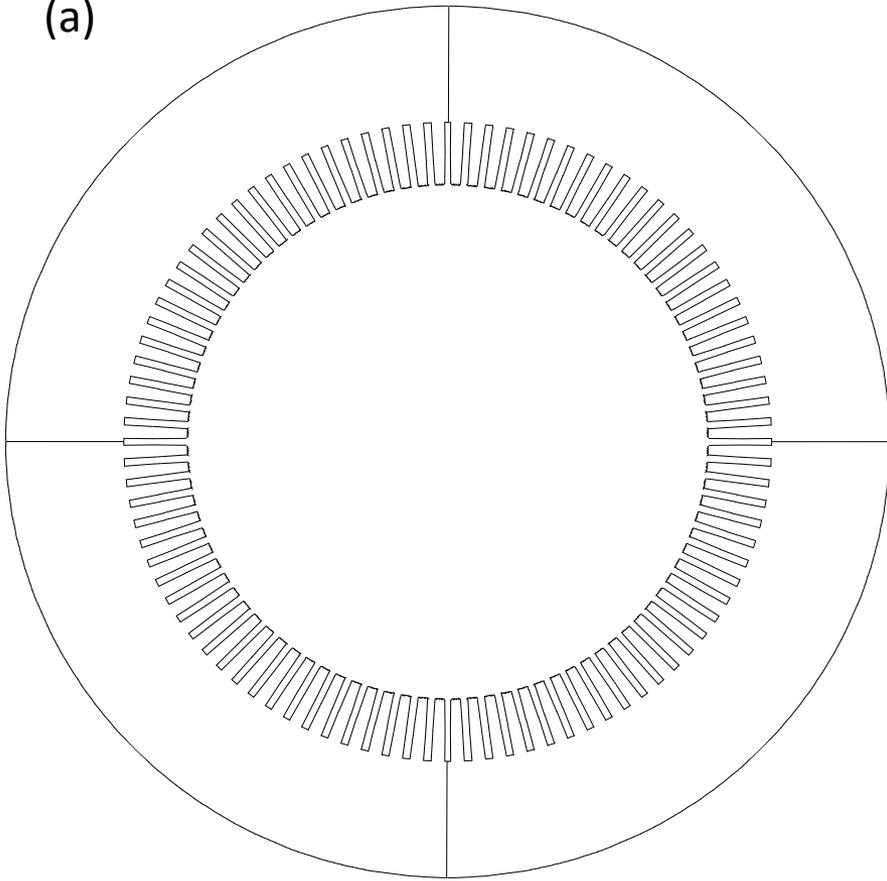
Quando il diametro esterno di statore eccede i 900 – 1000 mm, serve ricorrere alla costruzione a settori (v. figura). Il numero di settori è stabilito essenzialmente in base a due considerazioni:

- Riduzione dei costi di produzione (→ meno settori possibile)
- Riduzione degli sfridi di lamierino.

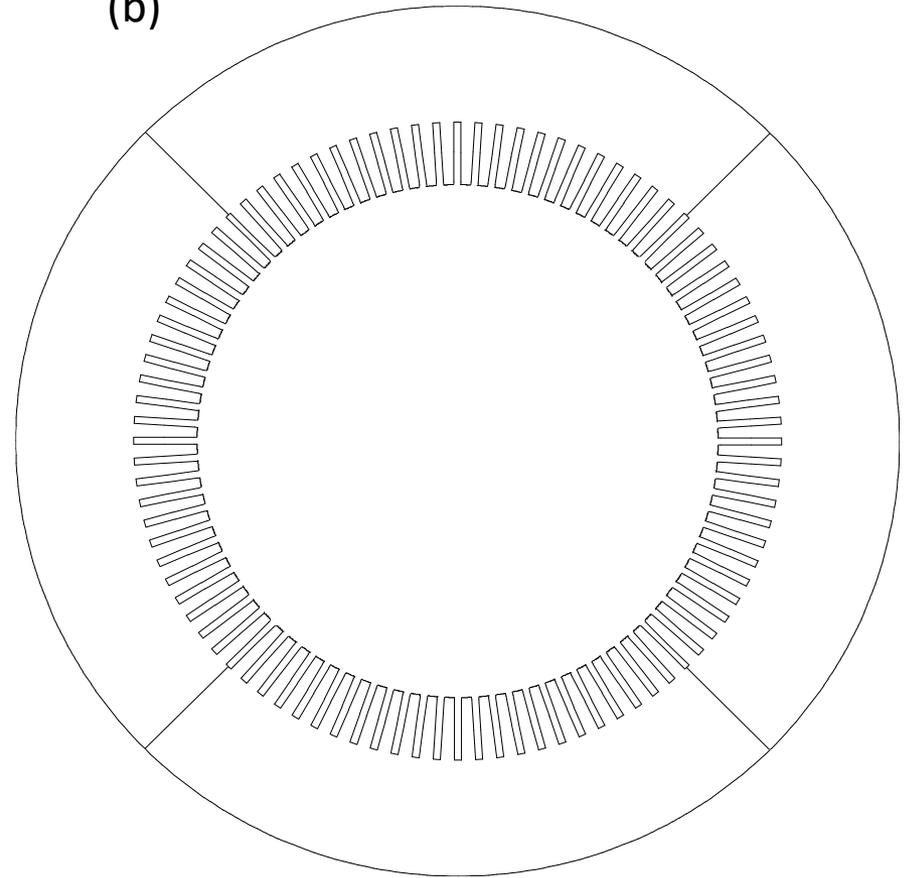


Per minimizzare la formazione di traferri in corrispondenza alle zone di discontinuità tra settori, il pacco laminato viene formato alternando strati composti secondo le configurazioni (a) e (b) rispettivamente.

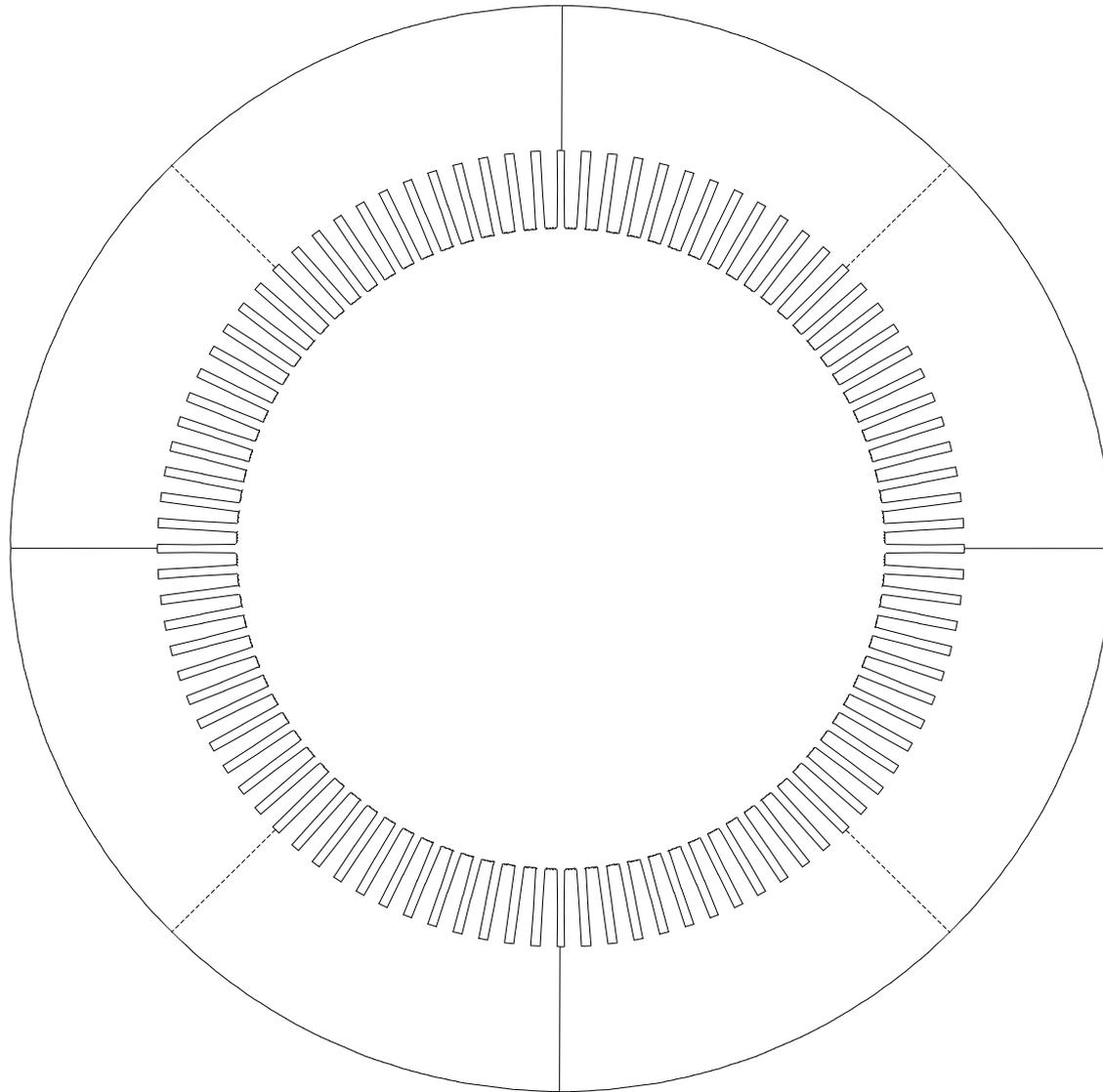
(a)



(b)



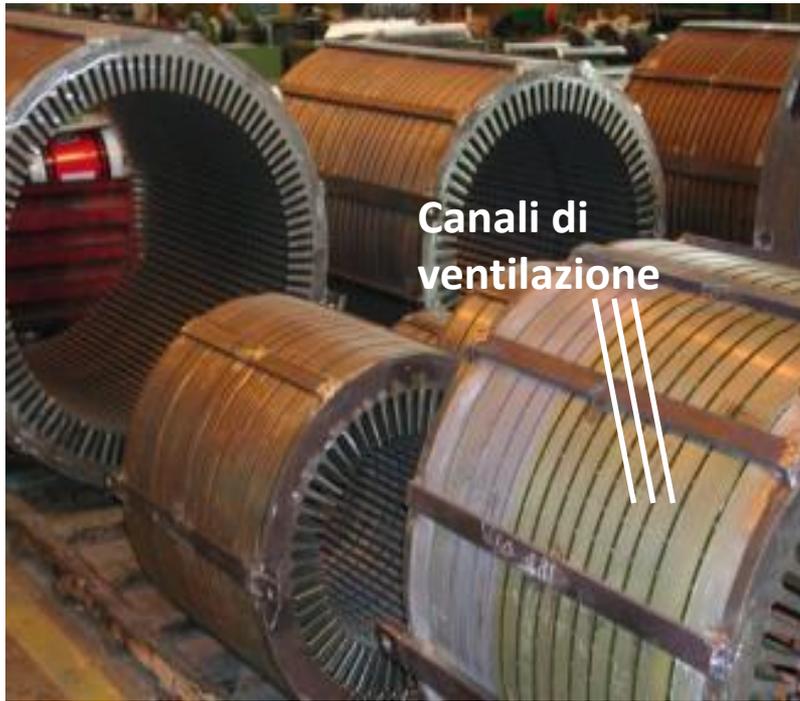
Risultato:



Durante l'impaccaggio su mandrino, lo statore viene anche dotato delle strutture ausiliarie di consolidamento meccanico:

- ❖ Distanziatori tra pacchetti di lamierini
- ❖ Piastre frontali
- ❖ Dita pressa-pacco
- ❖ Tiranti

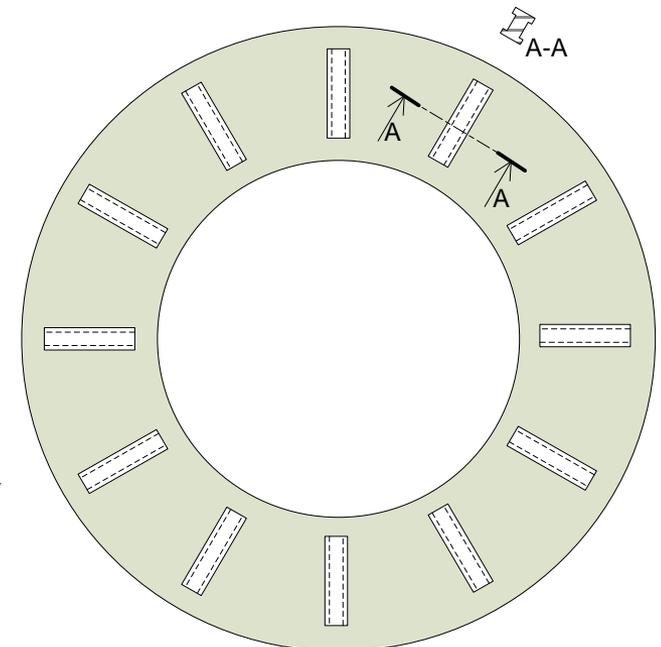




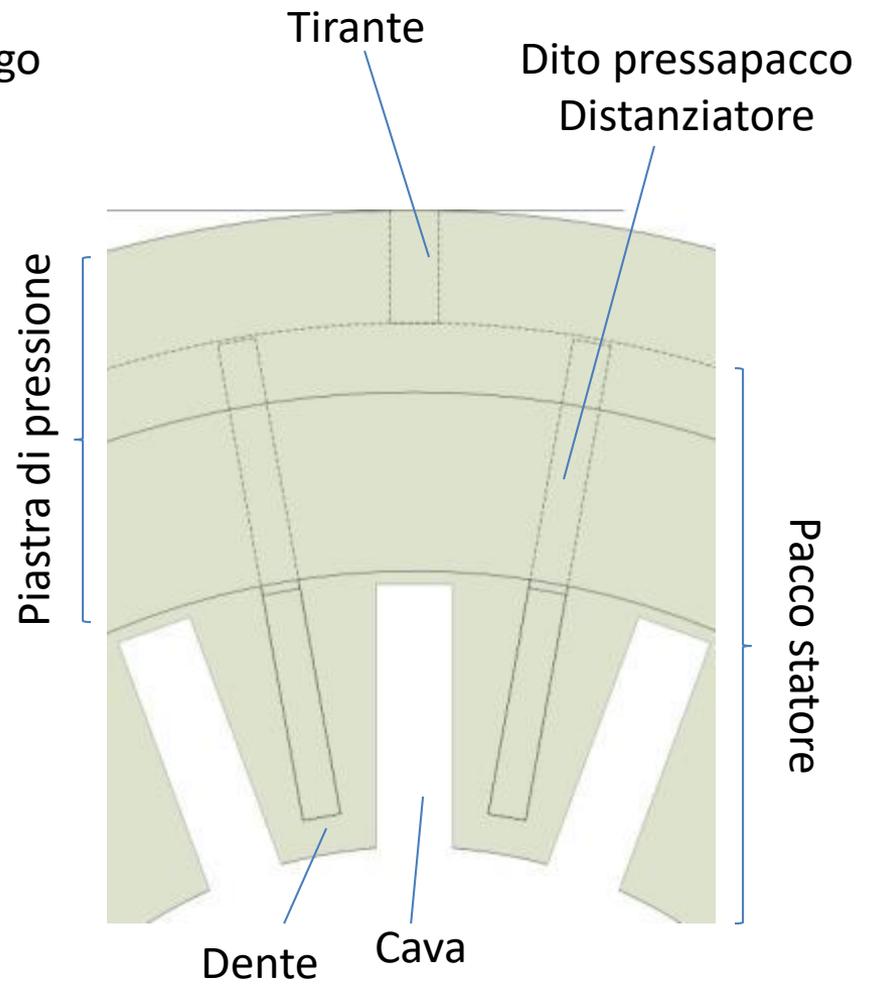
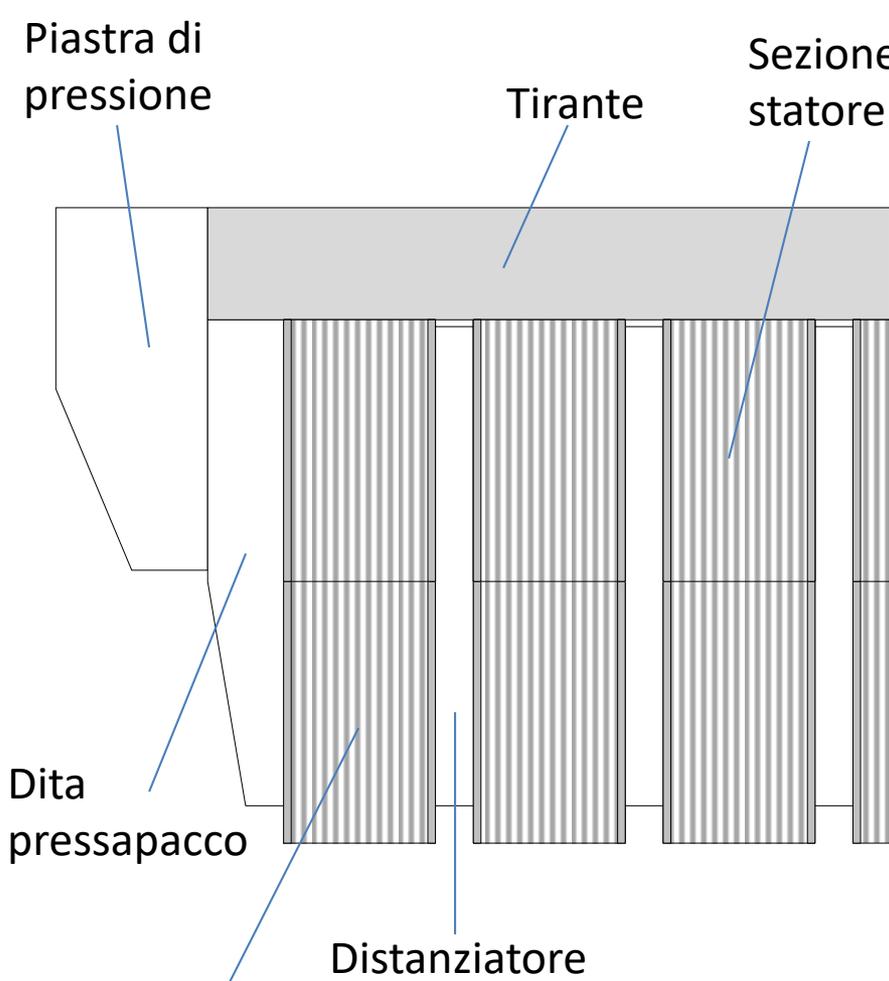
Per lunghezze di pacco superiori a **250 mm**, il pacco laminato di statore (e rotore) viene solitamente suddiviso in pacchetti elementari separati da zone d'aria che servono come canali radiali di ventilazione, cioè consentono all'aria di raffreddamento di fluire in senso radiale dal centro della macchina verso la periferia dello statore. I pacchetti sono separati da profilati ad "I" disposti radialmente e usati come distanziatori.

Nel caso di pacchi "lunghi", nella parte centrale del pacco (la più critica a livello di raffreddamento) è previsto un infittimento dei canali in modo da compensare la minor velocità dell'aria che vi fluisce.

Disposizione dei distanziatori tra pacchetti elementari. Analoga distribuzione delle dita pressapacco tra piastra frontale e pacchetti di testa.



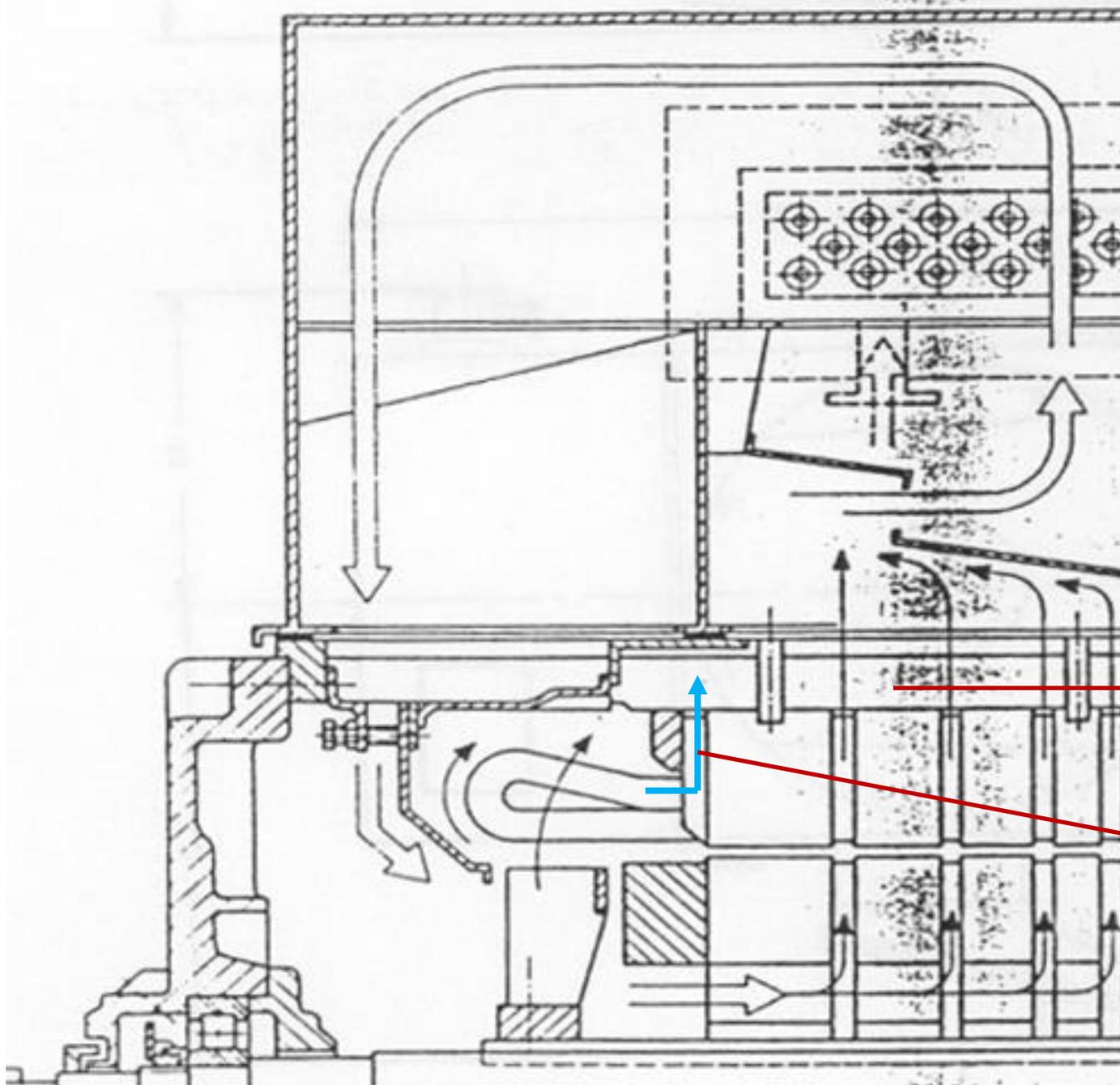
DETTAGLIO DI ESTREMITA' PACCO STATORE CON PIASTRA E DITA PRESSAPACCO



Parete dente statore

Le dita pressapacco hanno due funzioni:

- **Esercitare pressione sui denti in modo da evitarne l'inflessione verso l'esterno**
- **Creare un canale d'aria assiale alle estremità del pacco (utile per sfogo aria di raffreddamento testate)**



tirante

Percorso
d'aria tra
dita
pressapacco

DETTAGLIO DI ESTREMITA' PACCO STATORE CON PIASTRA E DITA PRESSAPACCO

Lamierino di estremità con spessore maggiorato



Canale assiale per ingresso aria

Piastra di pressione

Dita pressapacco
saldata alla piastra

Dente

Cava

DETTAGLIO DI ESTREMITA' PACCO STATORE SENZA DITA PRESSAPACCO



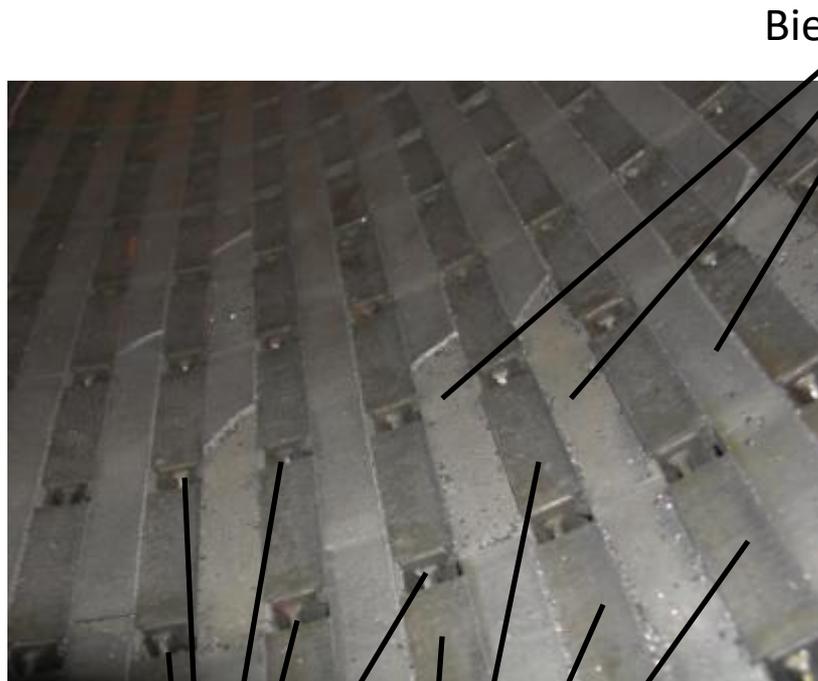
Per pacchi di minori dimensioni non sono previste le dita pressapacco e la piastra frontale di pressione è direttamente posizionata a contatto col pacco.

In questo caso la piastra deve essere lavorata in modo da riprodurre, con opportuna tolleranza, la forma delle cave (dita di pressione "integrate" con la piastra).

Questa soluzione presenta minore costo ma non consente il canale radiale d'aria all'estremità del pacco.

Piastra di pressione lavorata e posta direttamente a contatto con il pacco.

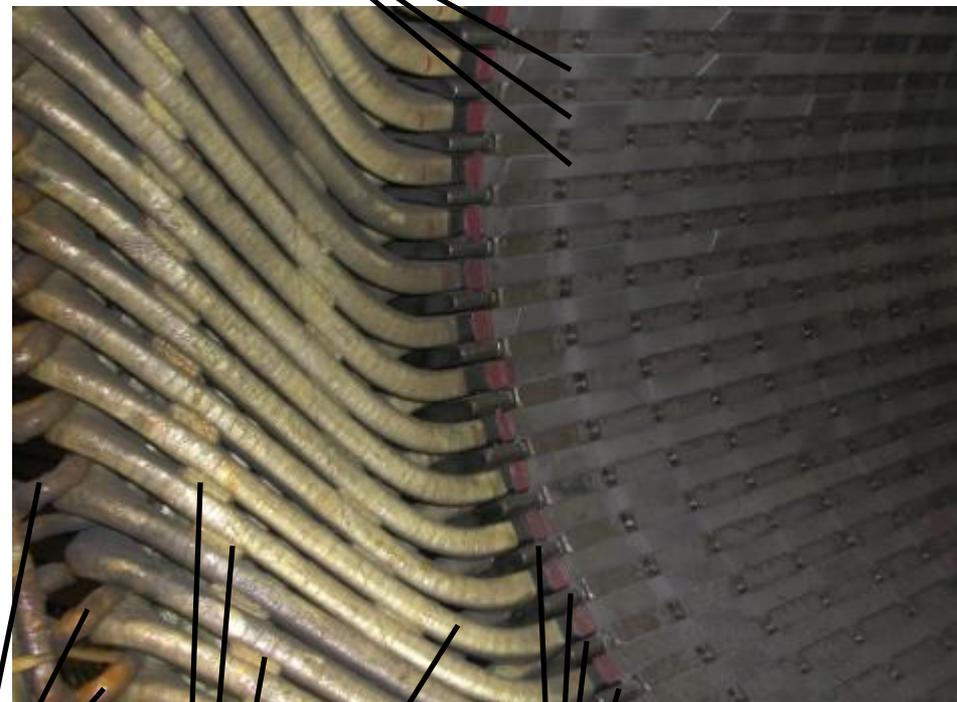
DETTAGLIO PACCHETTI LAMINATI E DISTANZIATORI



Distanziatori

Pacchetti

Biette per ritenzione
bobine



Collegamenti
corti

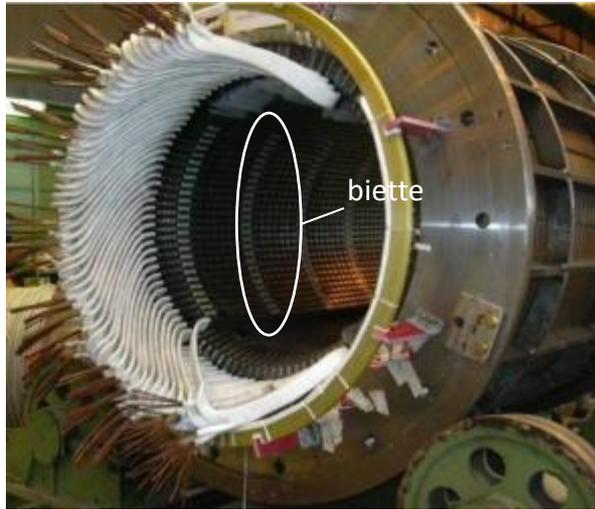
Distanziatori tra
testate

Testate

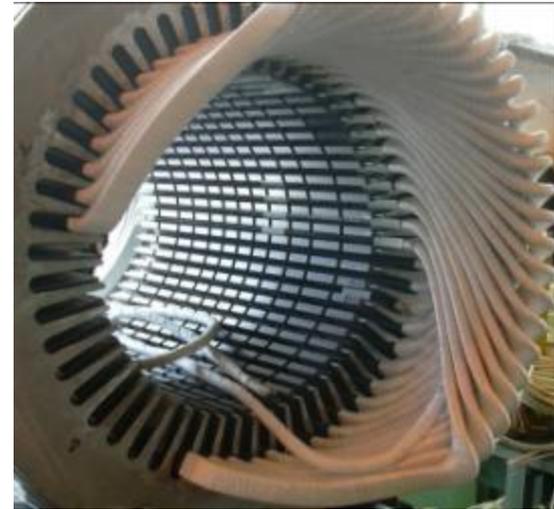
Estremità
flangia lavorata

AVVOLGIMENTO DEL PACCO

Dopo la costruzione del pacco laminato, si procede al montaggio delle bobine pre-formate (se avvolgimento in piattina) o alla esecuzione dell'avvolgimento (se in filo).



Statore durante il montaggio delle bobine –
Vista lato collegamenti



Statore durante il montaggio delle bobine – Vista
lato opposto collegamenti

Terminali di bobina (lato
collegamenti)

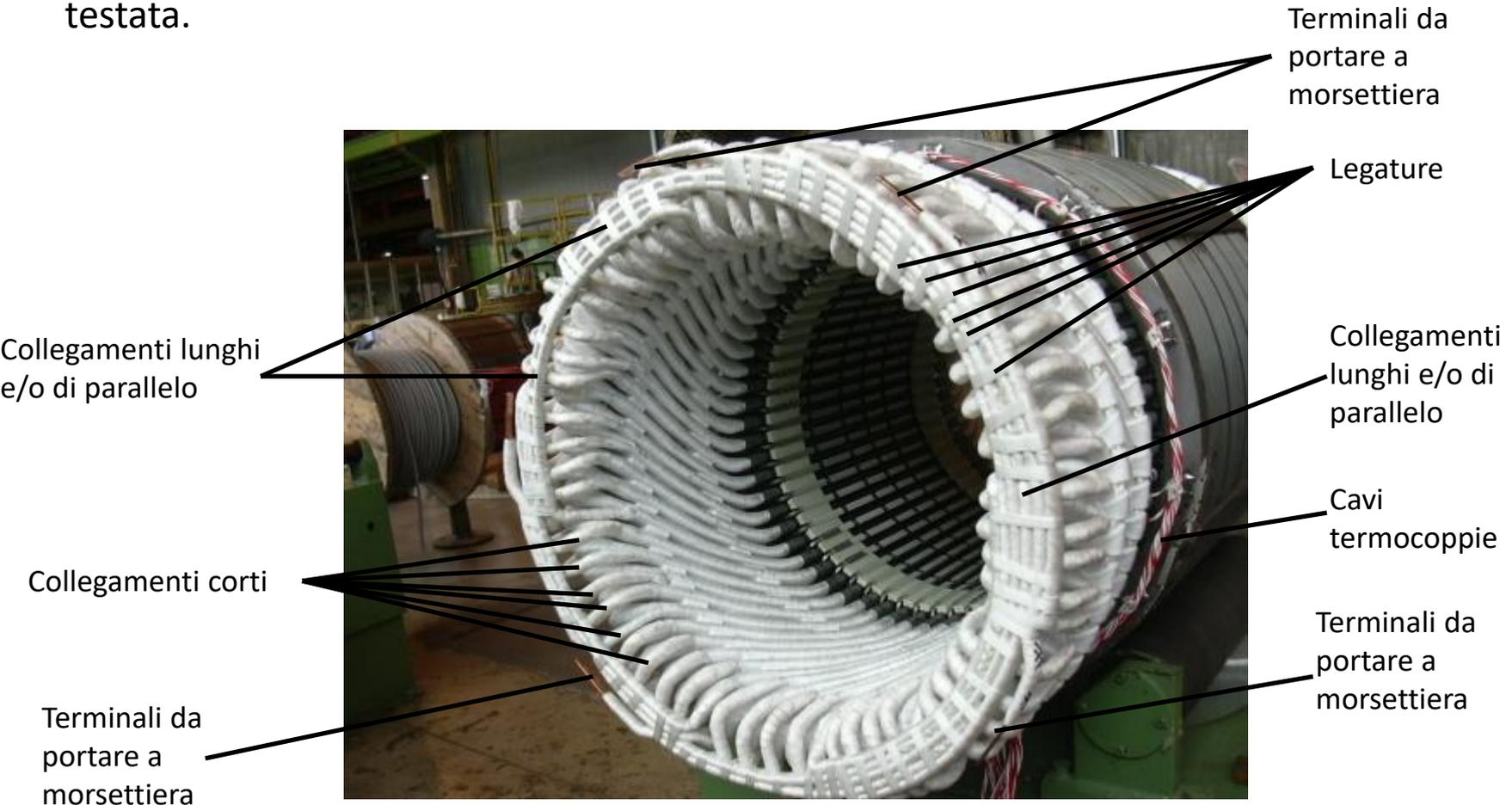


Esempio di bobina
preformata in piattina
prima del montaggio

Lato opposto
collegamenti

Dopo il montaggio delle bobine (caso di avvolgimento in piattina con bobine preformate), devono essere eseguiti i collegamenti tra le bobine, che sono:

- Collegamenti "corti", cioè connessioni in serie tra bobine adiacenti dello stesso gruppo
- Collegamenti "lunghi", cioè connessioni serie tra bobine appartenenti a gruppi diversi (quindi distanti almeno un passo polare)
- Collegamenti di parallelo: una stessa fase può comprendere diversi gruppi di bobine tra loro connessi in parallelo: le connessioni di parallelo sono a volte realizzate mediante "anelli" in testata.

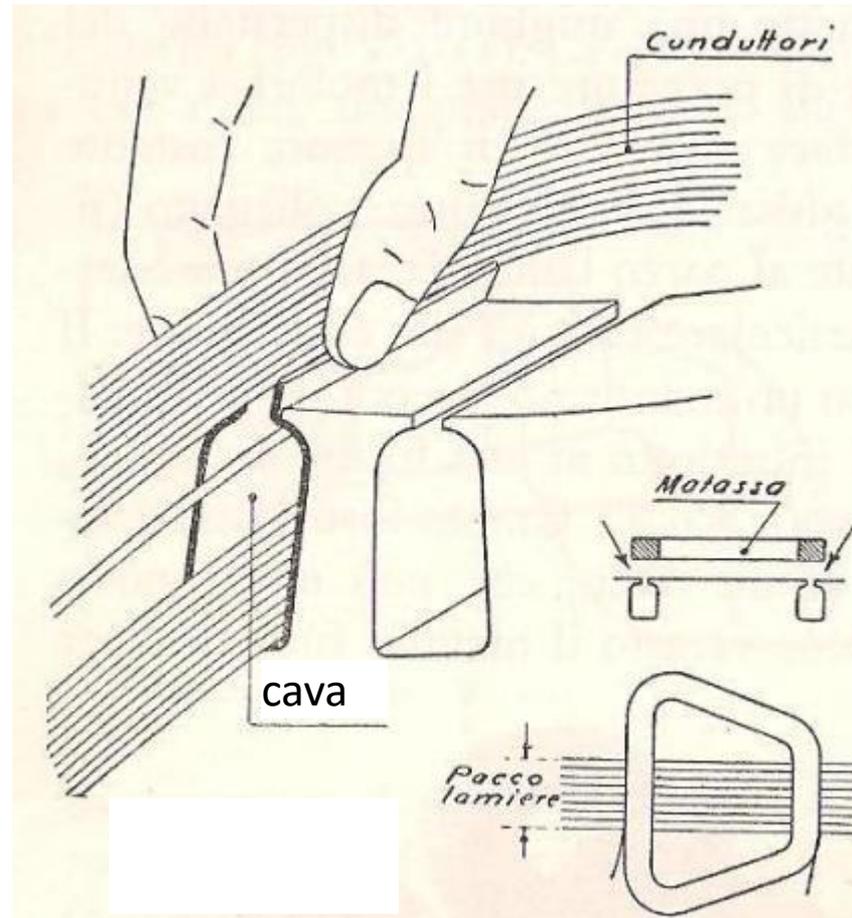


Stesso statore avvolto lato collegamenti (sx) e lato opposto collegamenti (dx)



Nel caso di avvolgimento in filo, i conduttori devono essere messi manualmente in cava, formando l'avvolgimento man mano che il conduttore viene avvolto.

In alternativa, è possibile preformare le bobine in filo (matasse) in modo automatico (macchina avvolgitrice).



IMPREGNAZIONE DEL PACCO AVVOLTO

In alcuni tipi di avvolgimento, le bobine sono dotate di nastri isolanti pre-impregnati, con resina. L'uso della resina per impregnare l'isolante è fondamentale allo scopo di riempire gli spazi d'aria tra strati di isolante, in quanto:

- In tali spazi verrebbero ad innescarsi fenomeni di scariche parziali, che porterebbero ad un progressivo deterioramento del sistema isolante ("treeing" fino a perforazione);
- gli spazi d'aria sono una barriera allo scambio termico conduttivo (la resina ha proprietà di conducibilità termica migliori dell'aria)

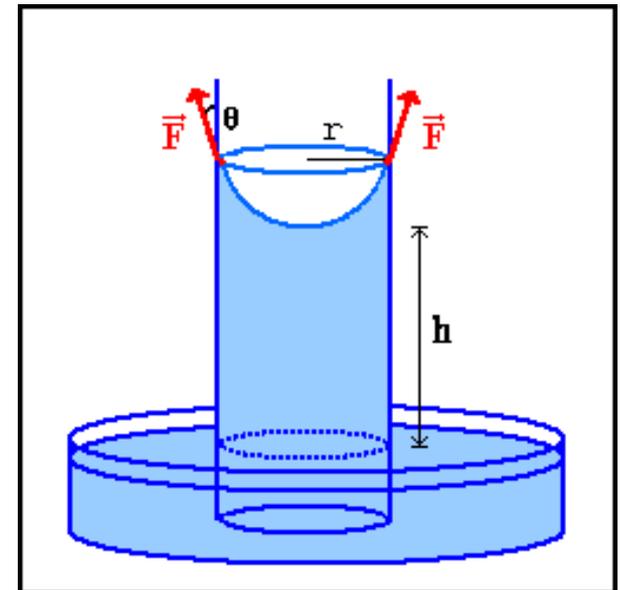
L'uso di nastri preimpregnati è frequente in macchine di dimensioni molto grandi (ad esempio turboalternatori con barre Roebel). Negli altri casi, dopo l'esecuzione dell'avvolgimento, lo statore avvolto deve essere sottoposto a impregnazione.

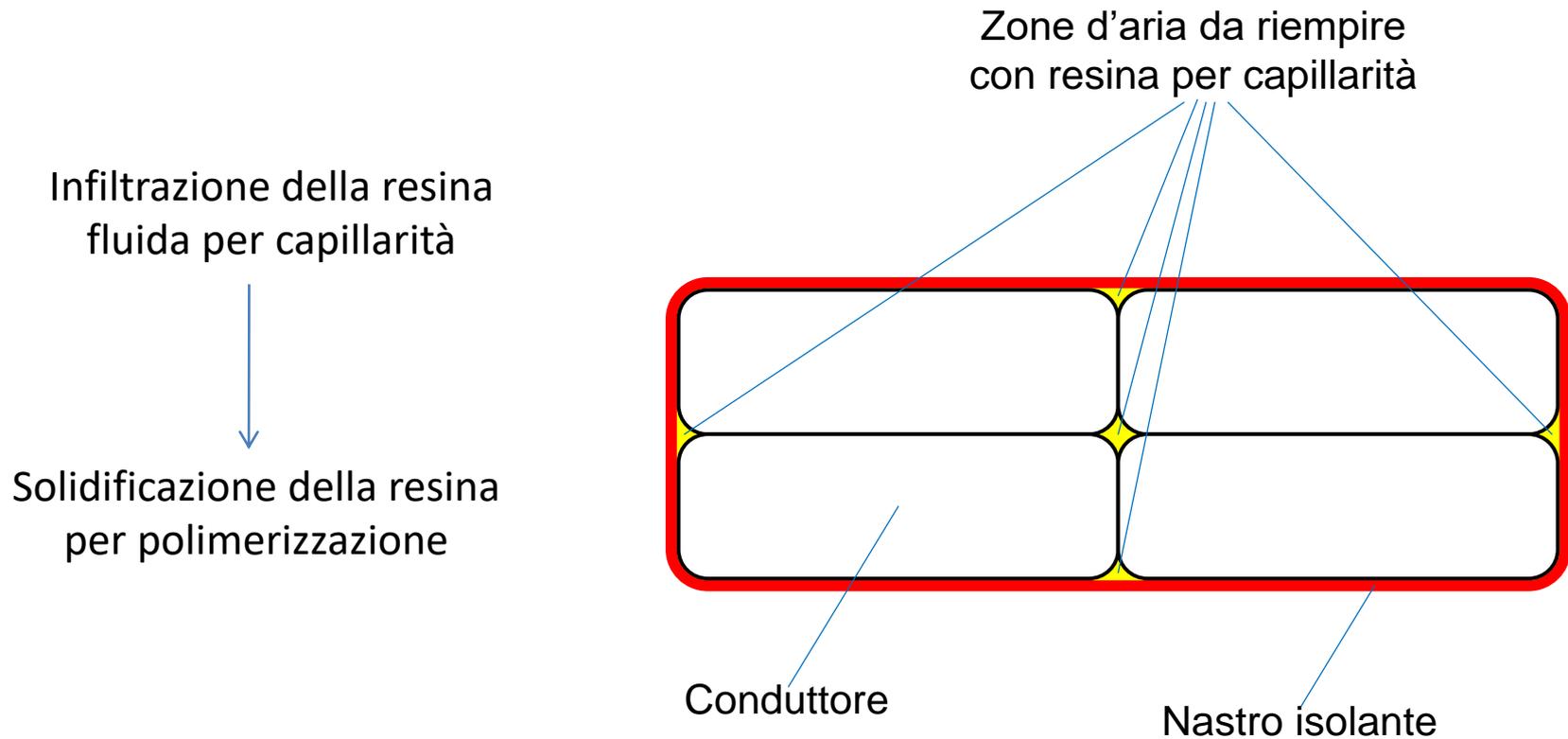
Una tecnica largamente usata a questo scopo è quella detta "Vacuum Pressure Impregnation" (VPI).

La tecnica VPI si basa sul fenomeno fisico della capillarità, precisamente sul fenomeno della "ascensione per capillarità".

L'ascensione per capillarità, nel caso di resina liquida, si verifica per spessori del tubo inferiori a 2 mm.

Il fenomeno della capillarità dipende dalle forze di adesione delle molecole del fluido alle superfici del tubo, forze che, per valori sufficientemente bassi di viscosità, sono superiori alle forze di coesione delle molecole stesse tra di loro.





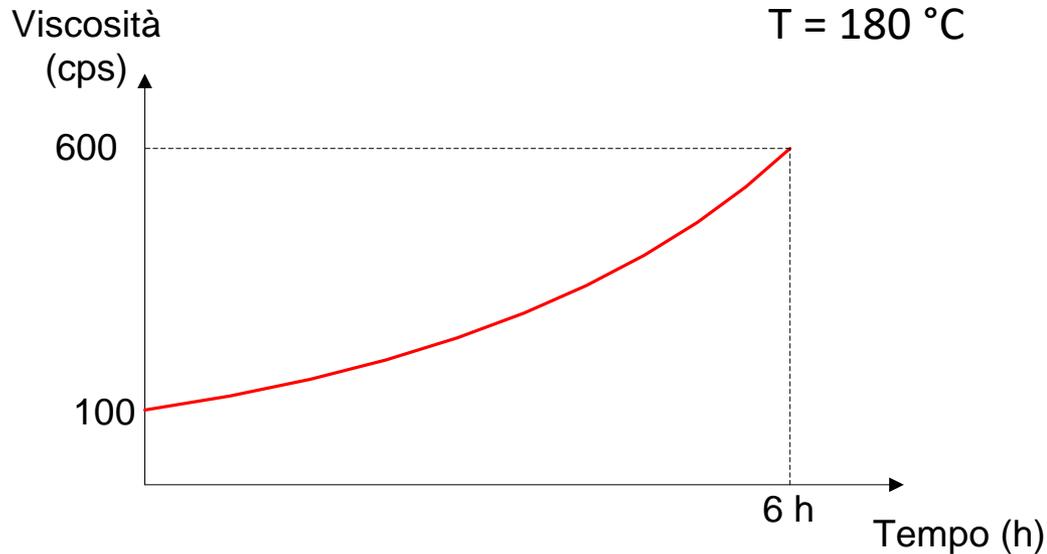
Affinchè il fenomeno dell'ascensione della resina per capillarità possa verificarsi, è necessario che gli spazi d'aria (assimilati a tubi cilindrici) non presentino diametri equivalenti inferiori a 2 mm. Questo porta tra l'altro a limitare il raggio di curvatura dei conduttori e a provvedere alla minimizzazione delle zone d'aria, prima dell'impregnazione, con l'uso di isolanti solidi.

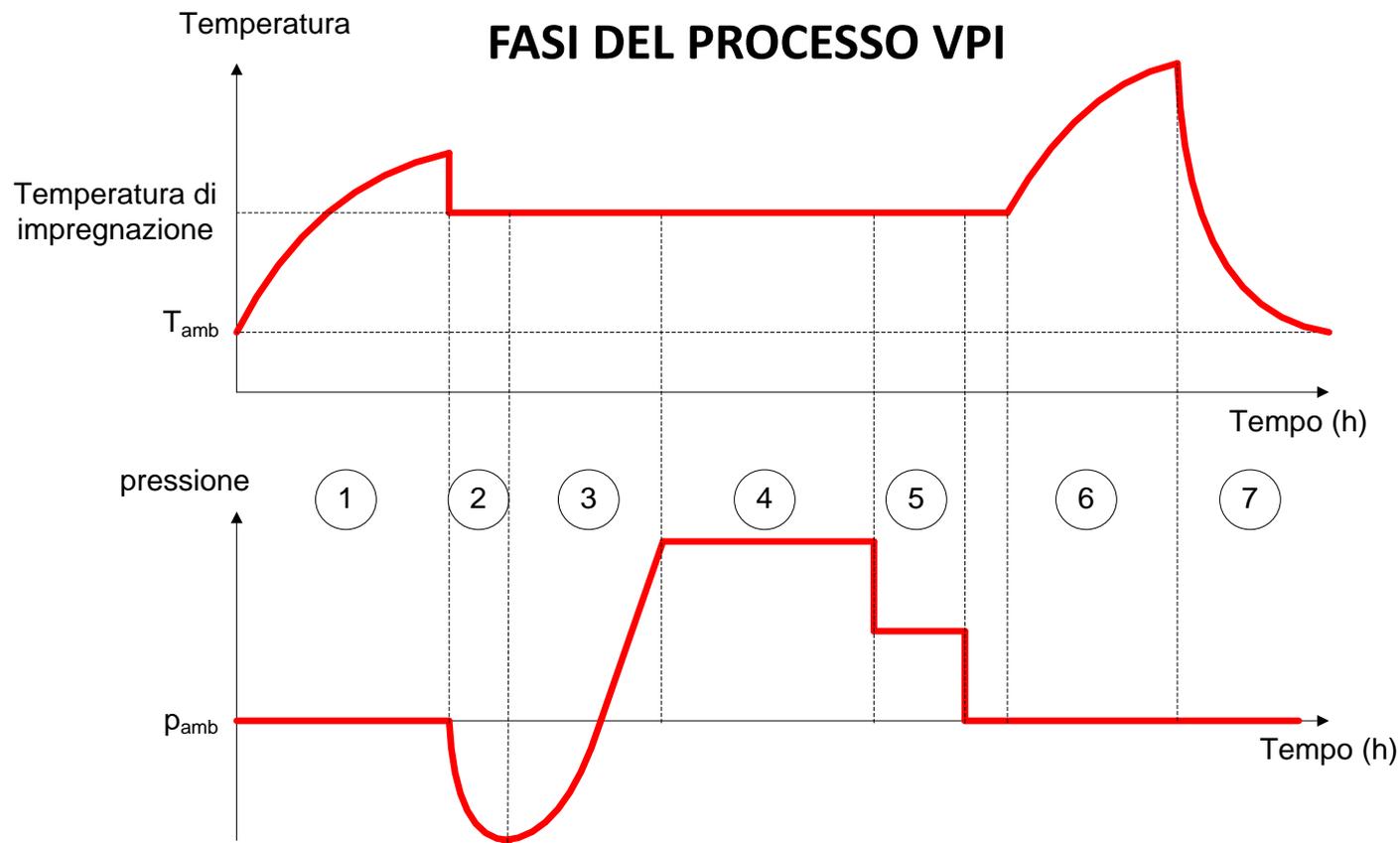
Dopo che la resina, allo stato fluido, si è infiltrata nelle cavità per capillarità, essa deve essere solidificata. La solidificazione avviene per polimerizzazione, che richiede una temperatura attorno a 160 – 180 °C.

L'impregnazione per capillarità può avvenire efficacemente solo se la resina è sufficientemente fluida, cioè se presenta un livello sufficientemente basso di viscosità (tipicamente sotto i 600 cps, v. grafico sotto).

Causa la polimerizzazione, la viscosità cresce progressivamente nel tempo, con una curva che dipende dalla temperatura a cui l'impregnazione viene realizzata. Ad esempio, se si impregna a 180 °C, la viscosità limite è raggiunta in circa 6 ore. Questo significa che l'impregnazione deve essere completata entro 6 h. Per essere sicuri di questo, si adotta un sistema in pressione.

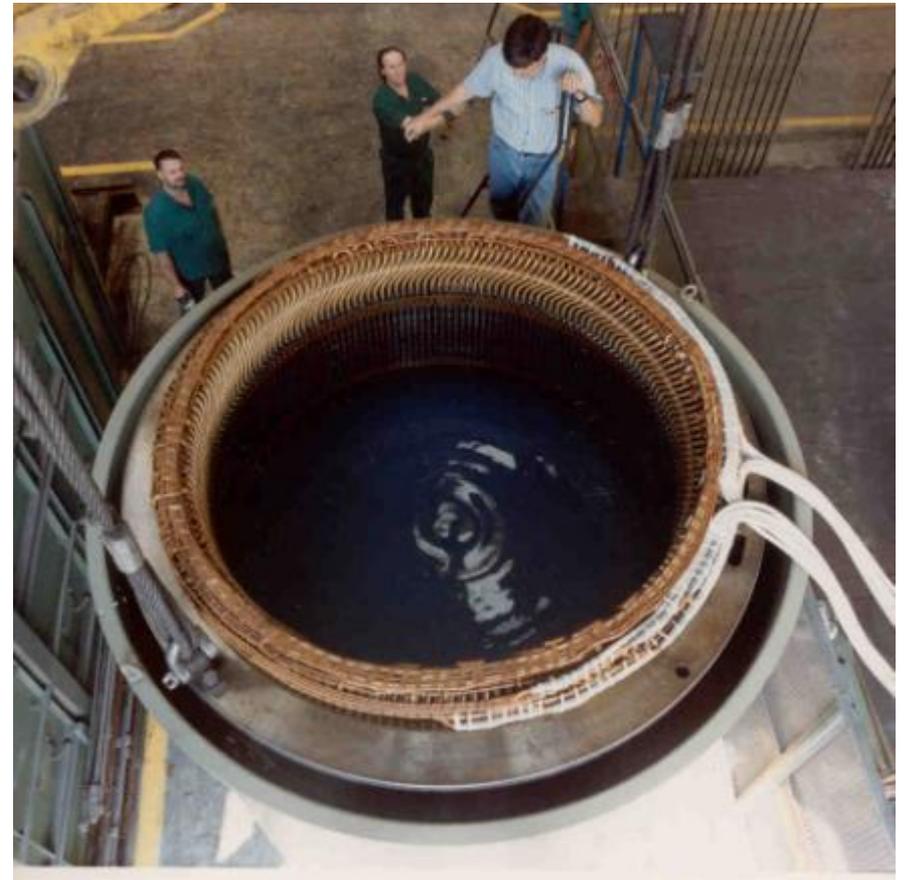
(1 cP = 1 mPa s)





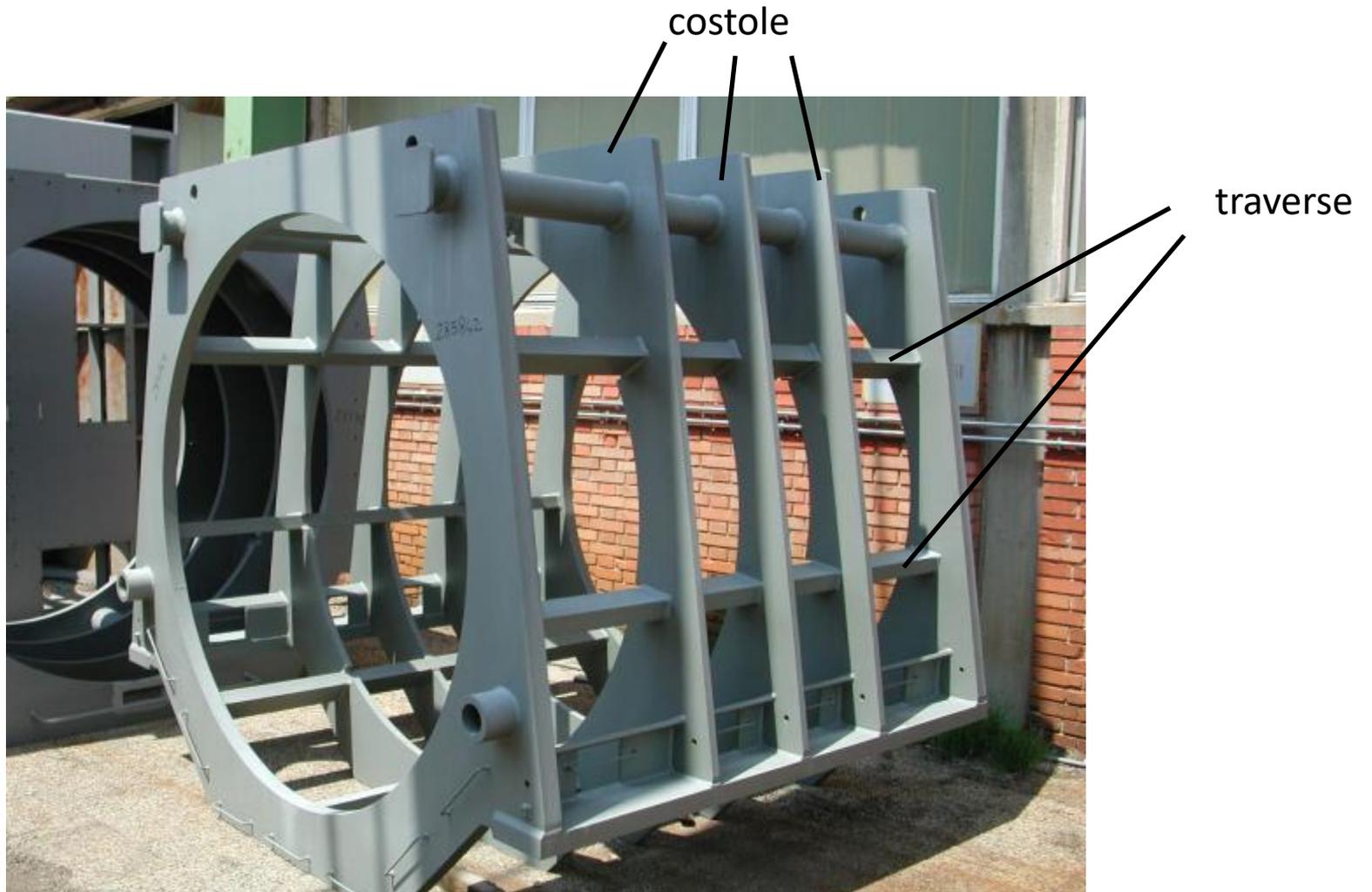
1. Essiccazione dello statore in autoclave (riscaldamento per estrazione di umidità)
2. Creazione del vuoto (ulteriore estrazione umidità)
3. Ingresso resina e incremento della pressione
4. Impregnazione per capillarità sotto pressione (a $T = 160 - 180 \text{ } ^\circ\text{C}$)
5. Uscita resina per riduzione della pressione
6. Polimerizzazione (solidificazione) in temperatura
7. Raffreddamento

Per macchine relativamente piccole, l'impregnazione dello statore può essere fatta dopo il montaggio in carcassa.

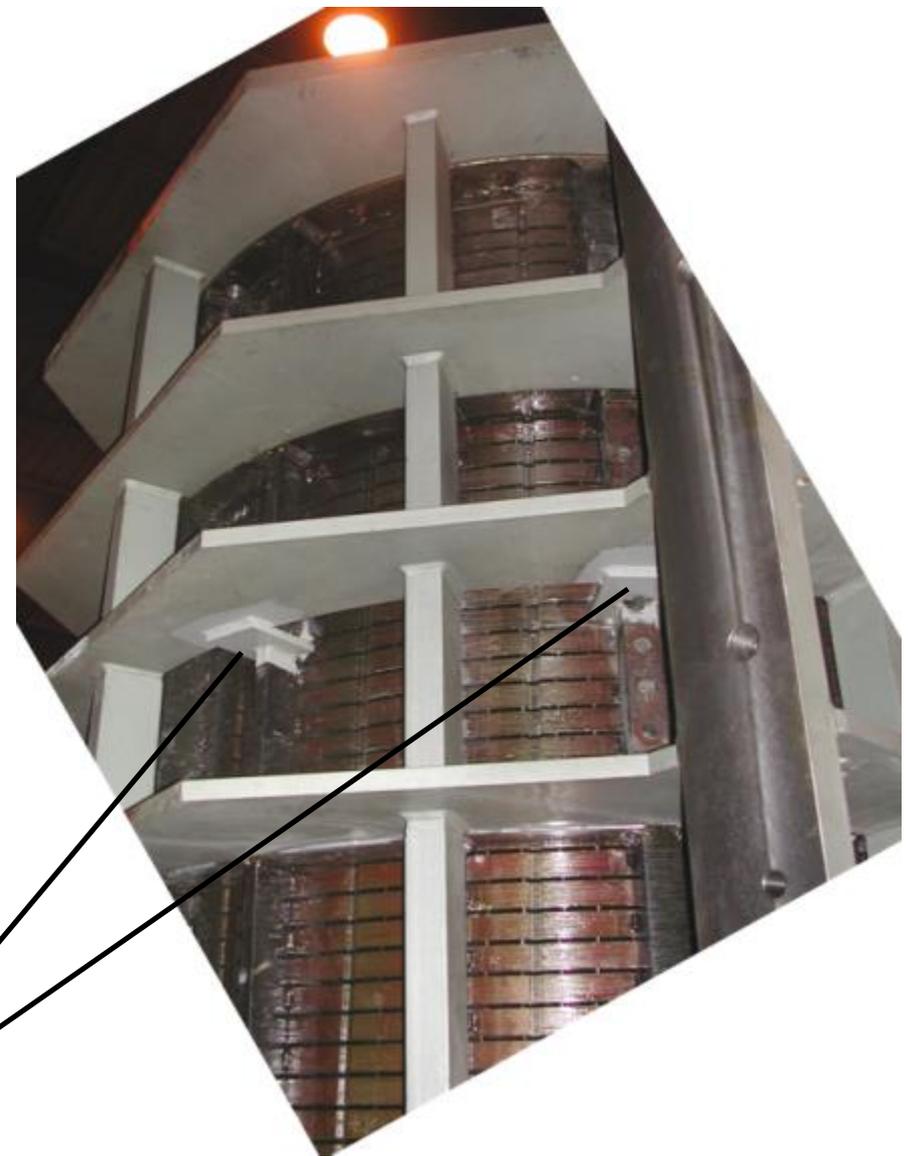


MONTAGGIO IN CARCASSA

Intelaiatura o “scheletro” della carcassa



Pacco inserito nell'incastellatura della carcassa



Fissaggio dei tiranti del pacco
statore alle costole della carcassa

All'incastellatura della carcassa vengono poi montate le lamiere laterali (mantello) e gli scudi frontali. Infine, se presente, viene montato lo scambiatore di calore.

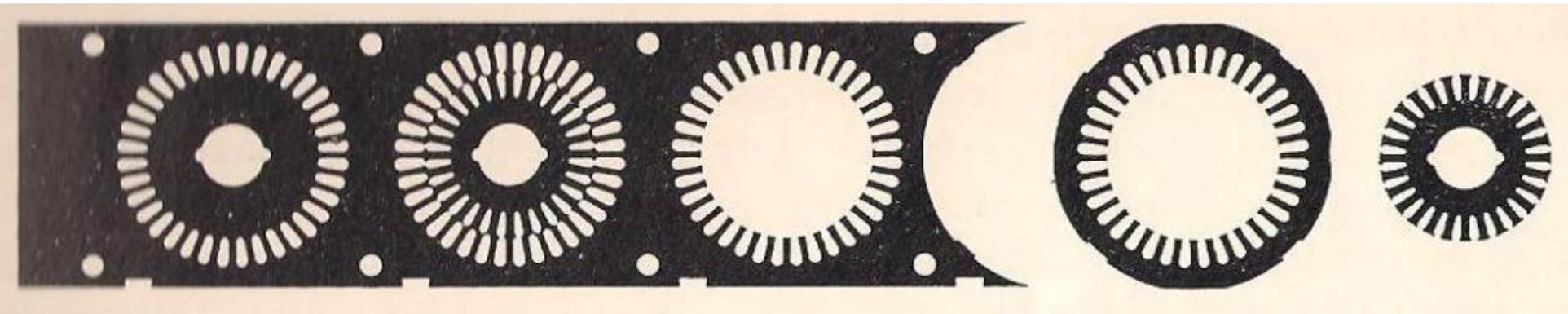
TECNOLOGIE DI ROTORE

La costruzione del rotore prevede:

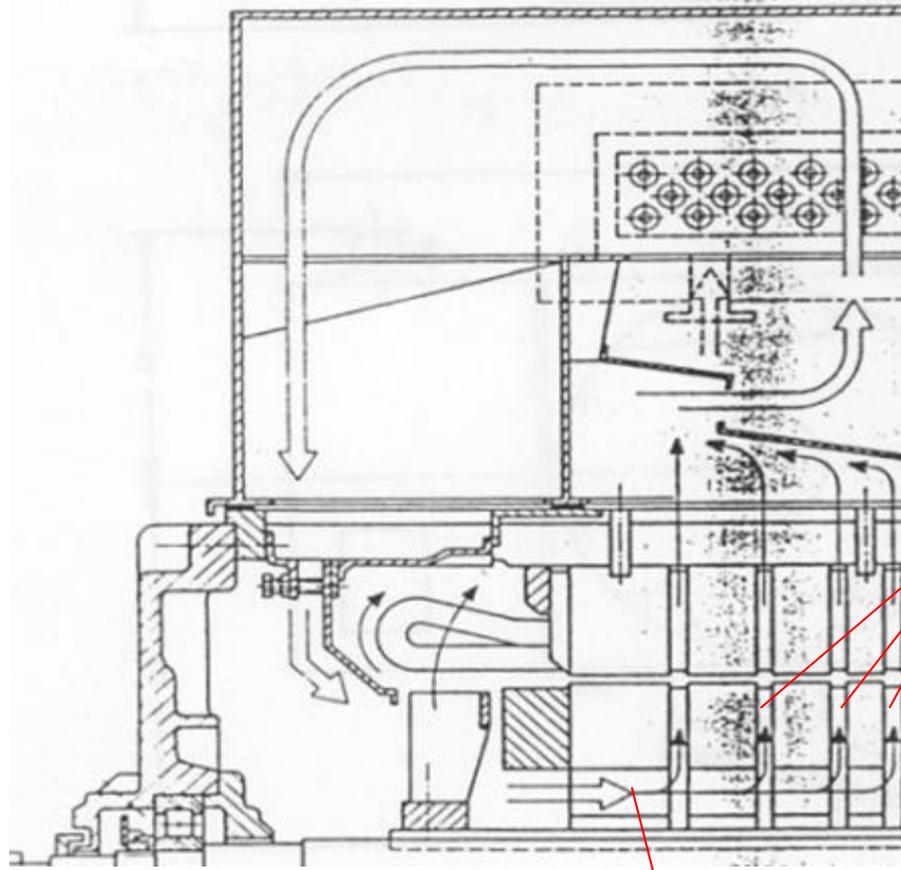
- Realizzazione del pacco laminato
- Realizzazione della gabbia di corto circuito o dell'avvolgimento (se rotore ad anelli)
- Montaggio del pacco sull'albero

REALIZZAZIONE DEL PACCO LAMINATO

Si usa lo stesso lamierino dello statore per ridurre gli sfridi.



Si usa la stessa larghezza e distribuzione dei pacchetti e dei canali assiali di raffreddamento. Infatti, i canali di rotore e di statore devono essere allineati in modo da facilitare il passaggio dell'aria dai canali di rotore a quelli di statore. Distanziatori tra pacchetti come nello statore.

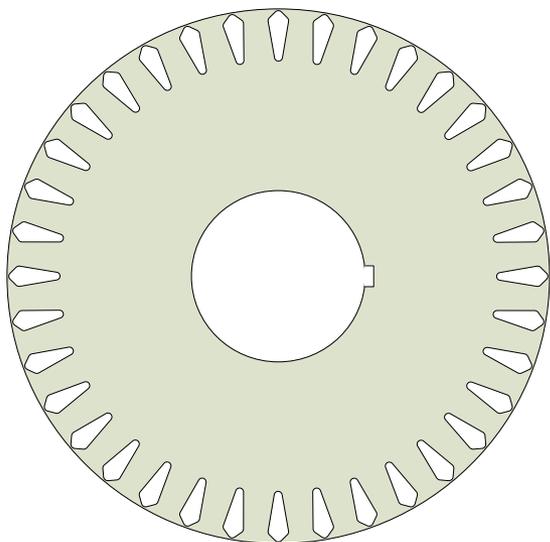


Canali assiali di rotore
allineati con quelli di
statore

Finestra di imbocco dell'aria

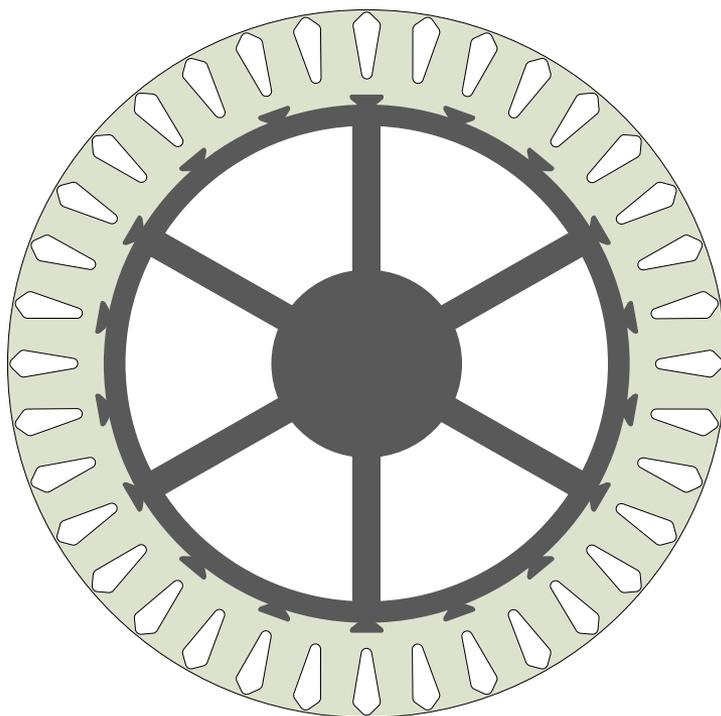
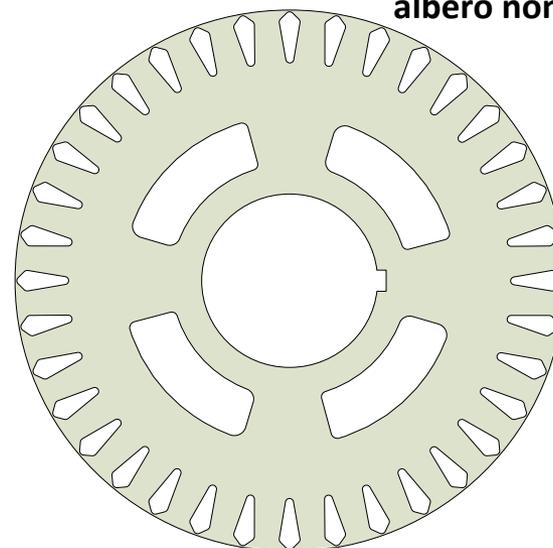
L'operazione di tranciatura e di punzonatura deve prevedere, oltre alle cave e alle circonferenze esterna ed interna di rotore, anche le finestre per il passaggio dell'aria di ventilazione prima in direzione assiale e poi attraverso i canali radiali.

FORME TIPICHE DI LAMIERINO TRANCIATO E PUNZONATO PER PACCO ROTORE



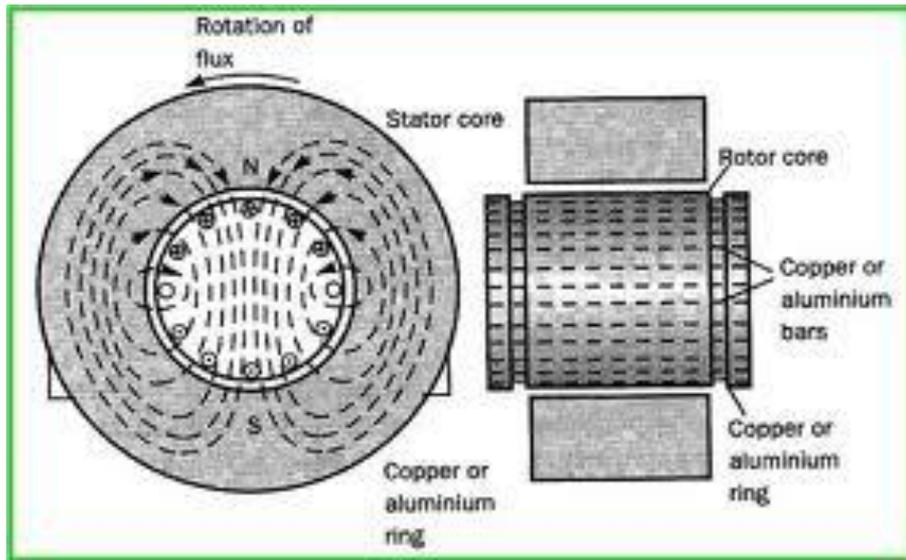
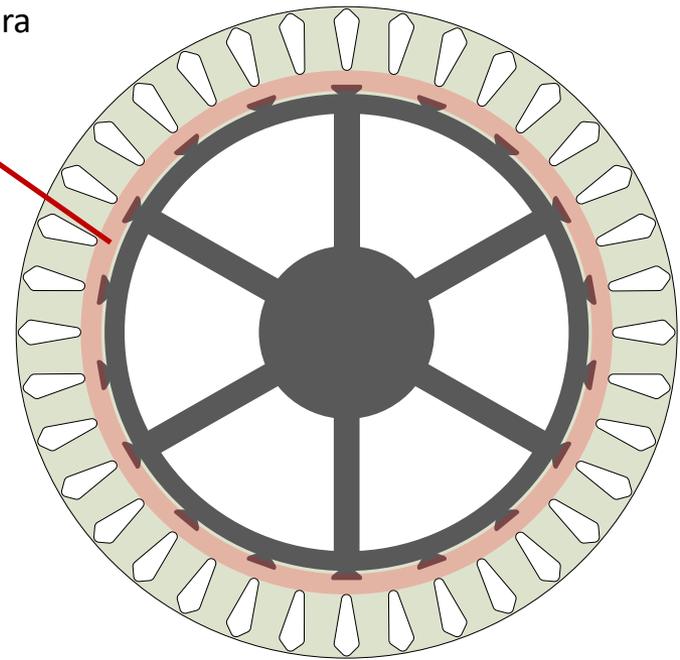
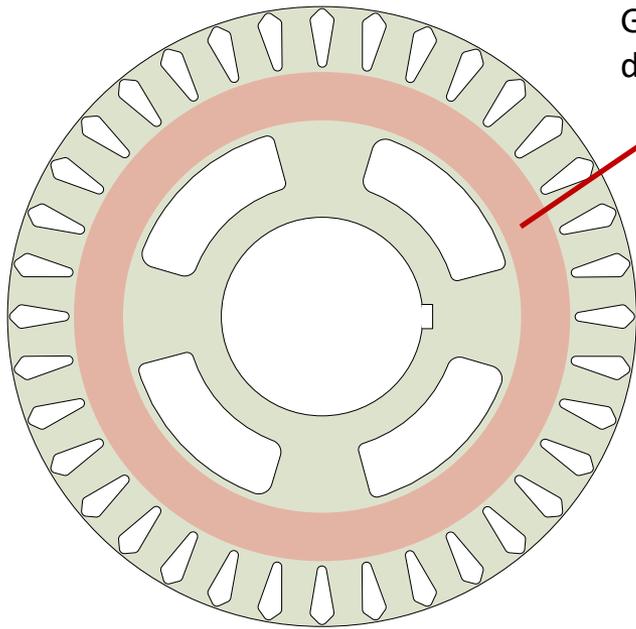
- ❑ Per macchine senza canali radiali di ventilazione (lunghezza pacco < 250 mm)
- ❑ Per macchine a due poli

Per macchine a 4 o più poli, con canali radiali di ventilazione (lunghezza pacco > 250 mm), con albero non razzato.



Per macchine ad alta polarità (grande diametro) con albero razzato.
Per questo tipo di macchine può essere necessaria la costruzione a settori anche per il rotore.

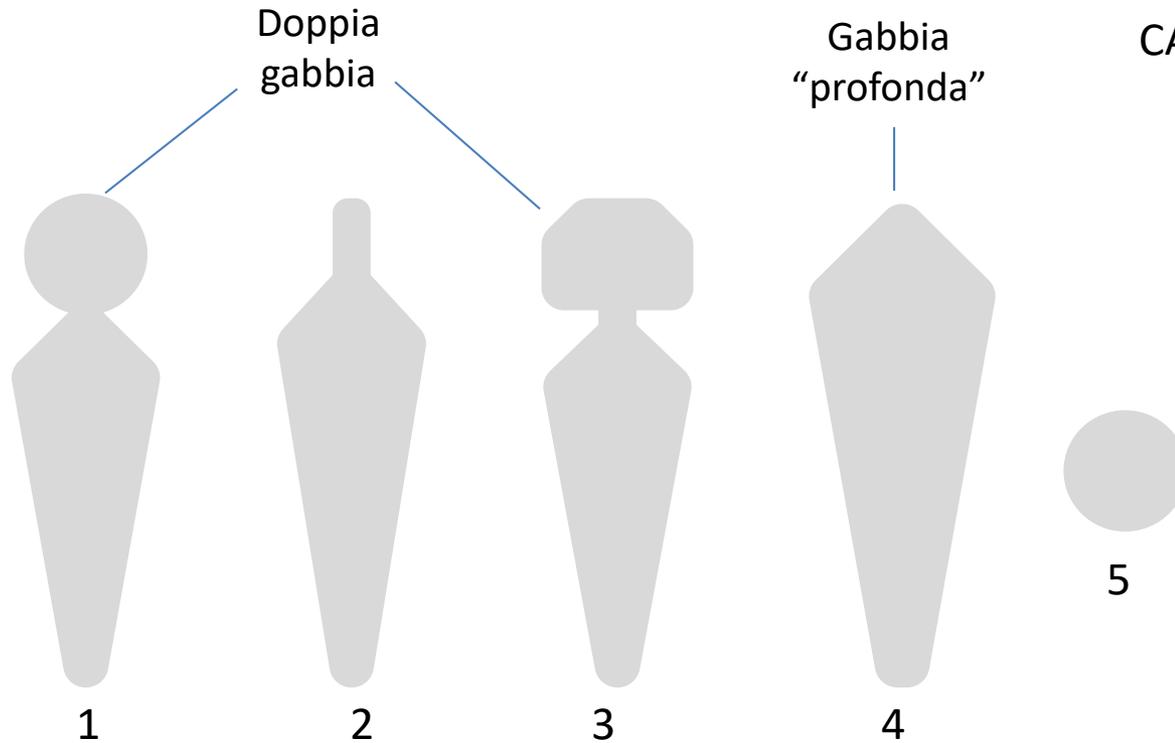
Giogo di rotore per richiusura del flusso tra poli adiacenti



Criticità della macchina asincrona a due poli: il flusso si deve richiudere attraverso l'intero rotore (albero compreso), quindi l'uso di finestre di ventilazione assiale non è possibile in quanto darebbe luogo a saturazioni.

(nelle macchine asincrone a due poli tutta l'aria di raffreddamento deve entrare attraverso il traferro; per aumentare la superficie di imbocco del traferro si utilizzano le "precave").

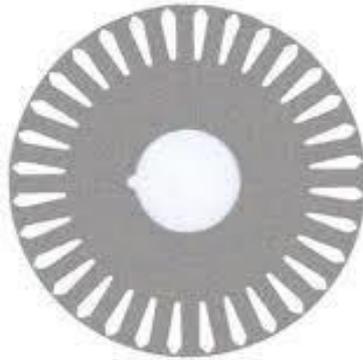
FORME DI CAVE ROTORICHE



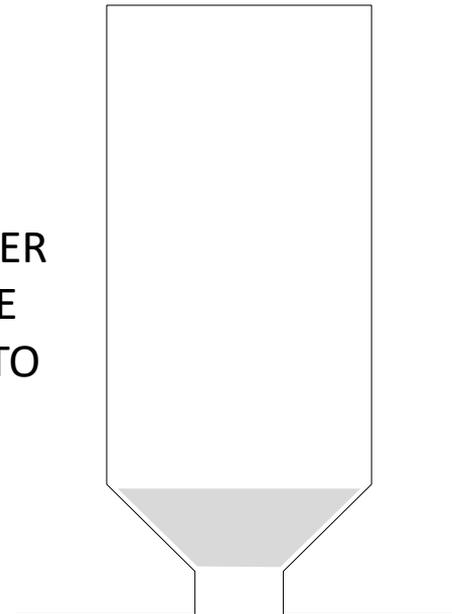
CAVE PER ROTORE A GABBIA

Nelle macchine di potenza media ed alta, la gabbia "profonda" è preferibile. La forma più usata nelle macchine di potenza medio-alta è la 4.

Solo per piccole macchine si usano cave e barre circolari (5).

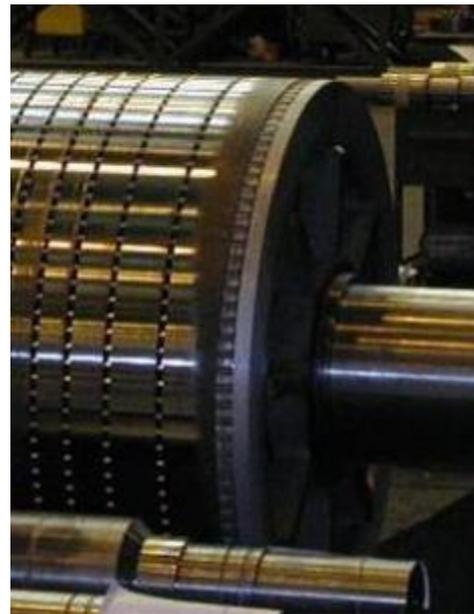
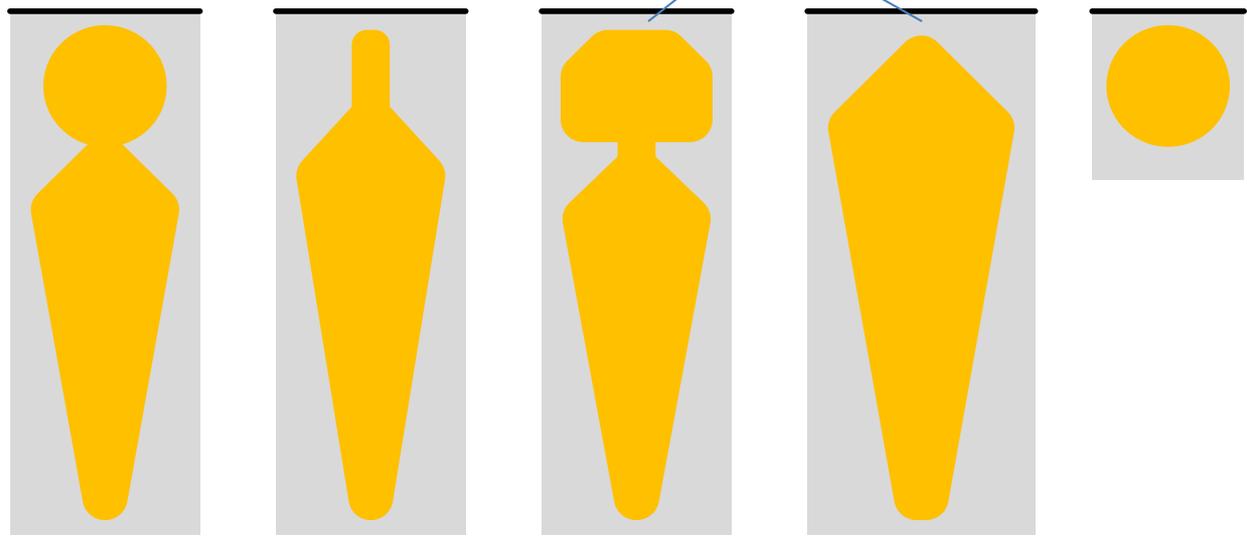


CAVA PER
ROTORE
AVVOLTO

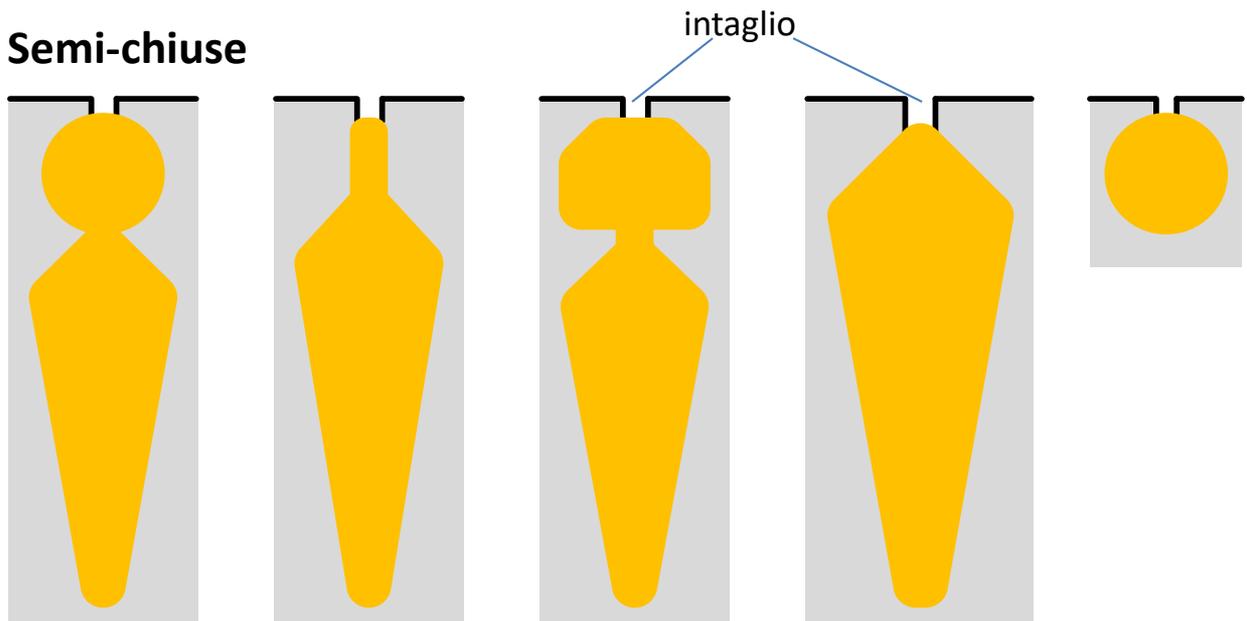


In generale, le cave possono essere chiuse o semichiusse, cioè con o senza intaglio.

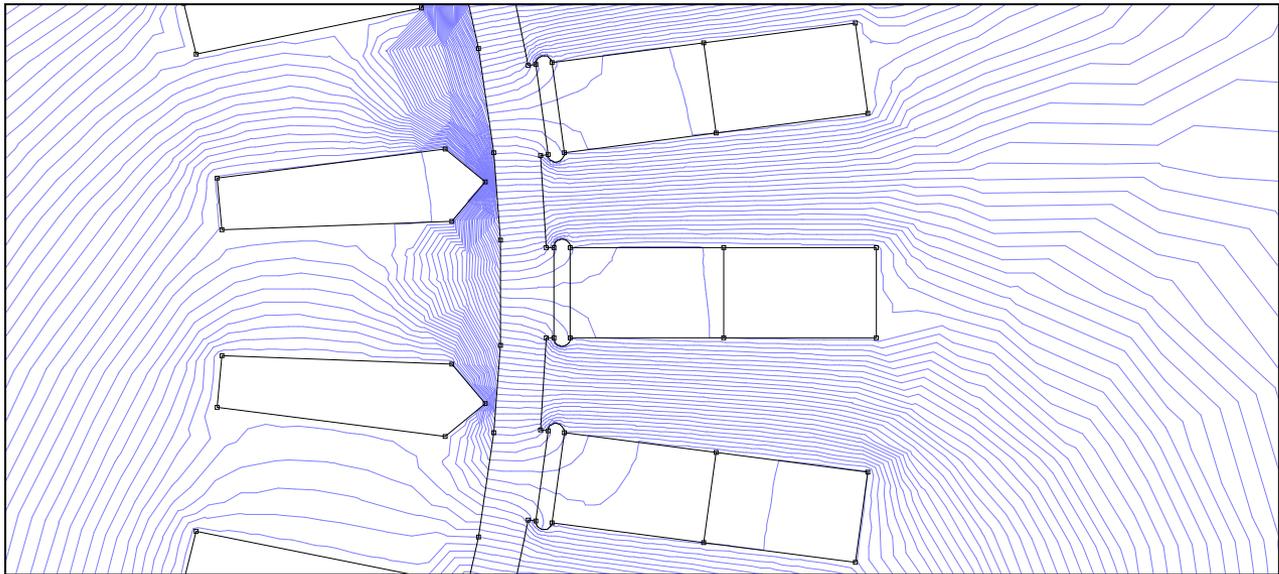
Chiuse



Semi-chiuse



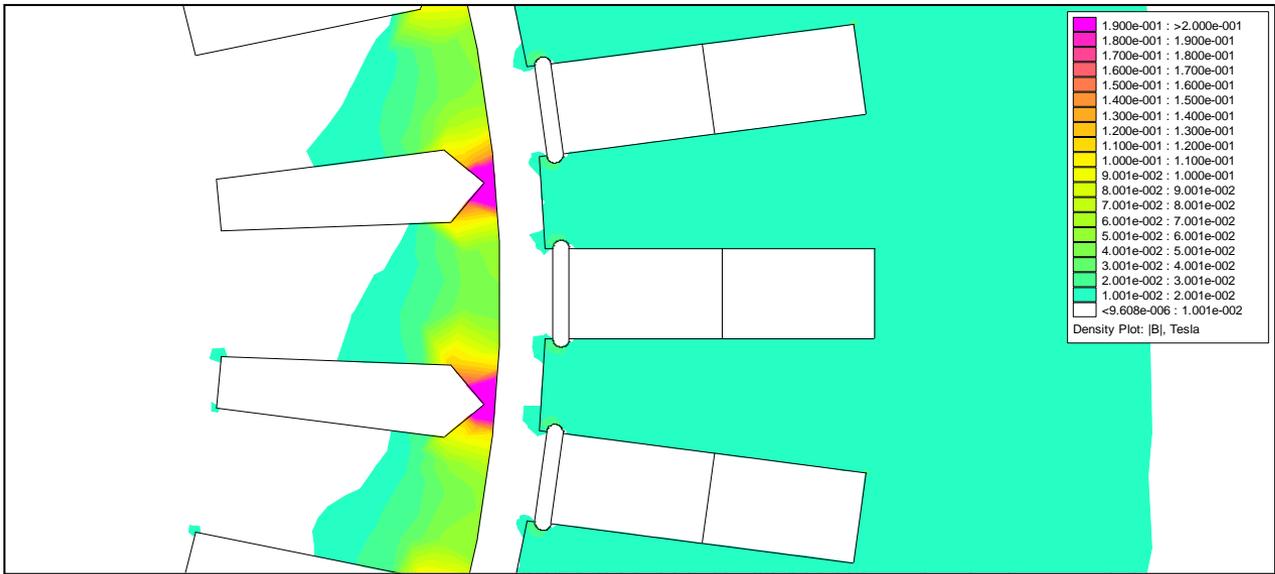
La larghezza dell'intaglio viene stabilita in modo da controllare la induttanza di dispersione della gabbia. Nel caso di cave semichiusure, si verifica una saturazione del ponticello, che porta, da un punto di vista magnetico, alla creazione di un "intaglio" equivalente.



In assenza di saturazione, tutte le linee passerebbero per il ponticello.

In realtà il lamierino satura nella zona del ponticello raggiungendo permeabilità simili a quelle dell'aria.

L'effetto è quello di un intaglio equivalente, le cui dimensioni possono essere calcolate con metodo FEM o da formule empiriche.



L'impaccaggio dei lamierini avviene come per lo statore: con mandrino e guide inclinabili che consentono di ottenere cave inclinate.



Per pacchi sopra i 250 mm, è necessario che il rotore abbia lo stesso numero e la stessa distribuzione di canali radiali di raffreddamento. Anche per il rotore si usano distanziatori tra pacchetti in corrispondenza dei canali di ventilazione.



Barra

Distanziatori

REALIZZAZIONE DELLA GABBIA DI CORTO CIRCUITO

La gabbia di corto circuito può essere realizzata con i seguenti materiali:

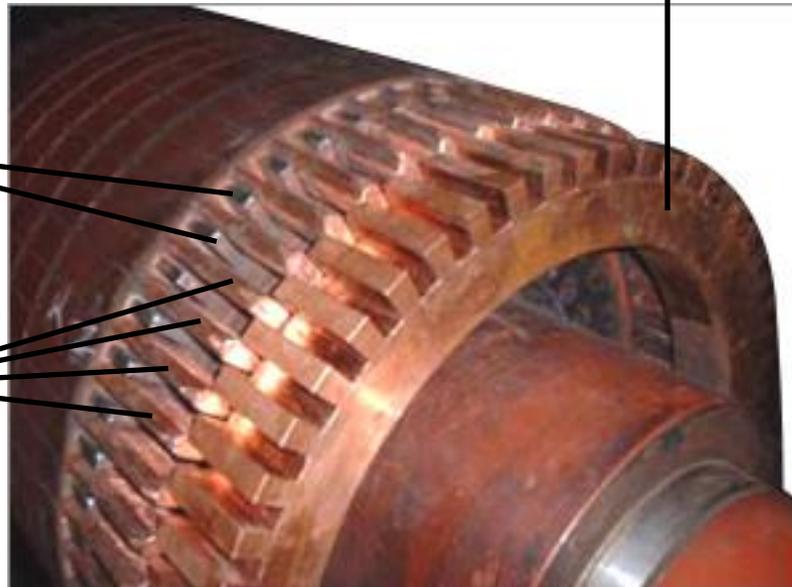
- Alluminio (leggero, basso costo, buone proprietà meccaniche, facile saldatura)
 - Rame (può essere usato per aumentare il rendimento)
 - Bronzo
 - Ottone
- Per aumentare la corrente di spunto (maggiore resistività, buona conducibilità termica)

Le barre sono inserite nelle cave di rotore dopo essere state raffreddate (ad esempio in azoto liquido). Il raffreddamento produce una riduzione di sezione favorendo l'inserimento. Il ritorno della barra a temperatura ambiente provoca una dilatazione termica che crea una pressione adeguata della barra stessa contro le pareti di cava (calettamento a freddo).

Anello lavorato in fase di montaggio

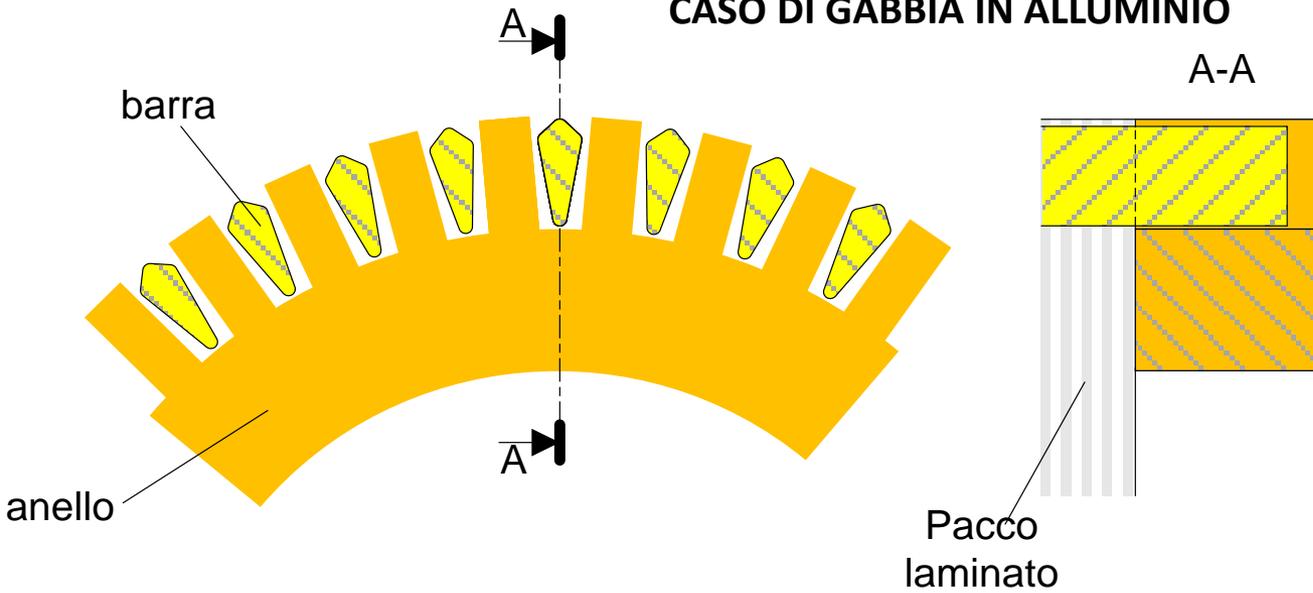
Piastra di pressione

barre



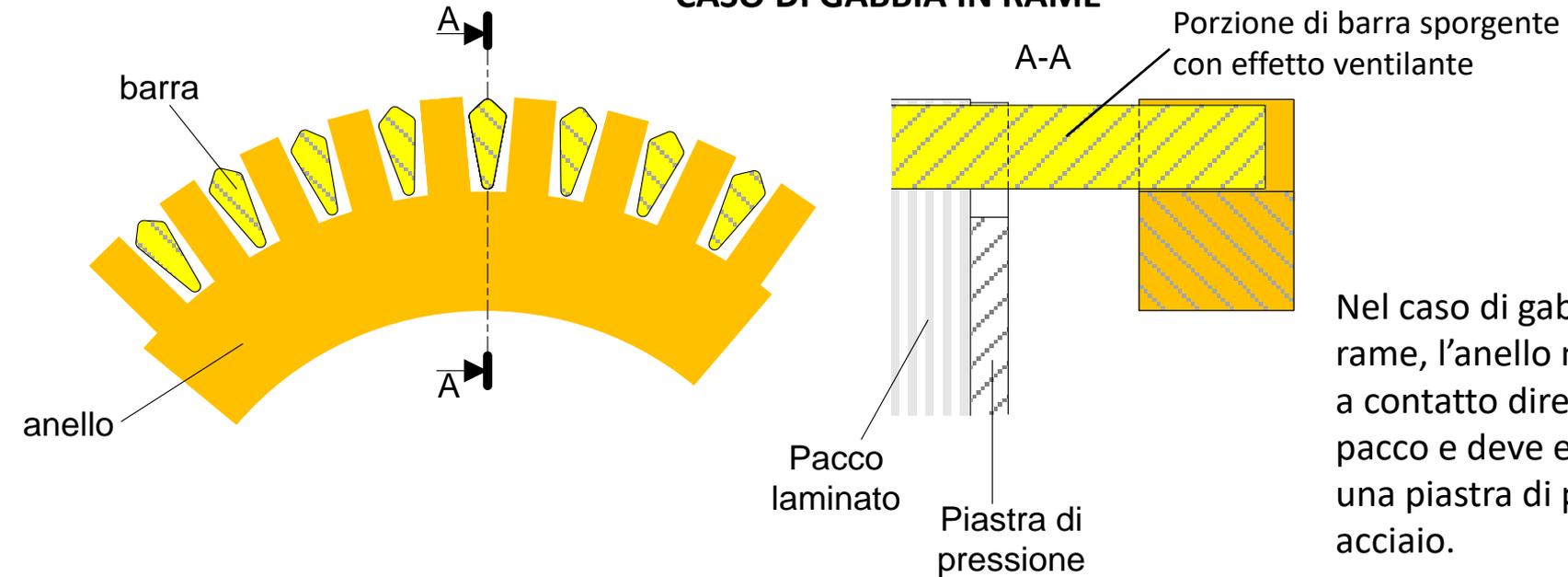
Nel caso di gabbia in rame, è necessario usare una piastra frontale di pressione per tenere il pacco laminato in pressione.

CASO DI GABBIA IN ALLUMINIO



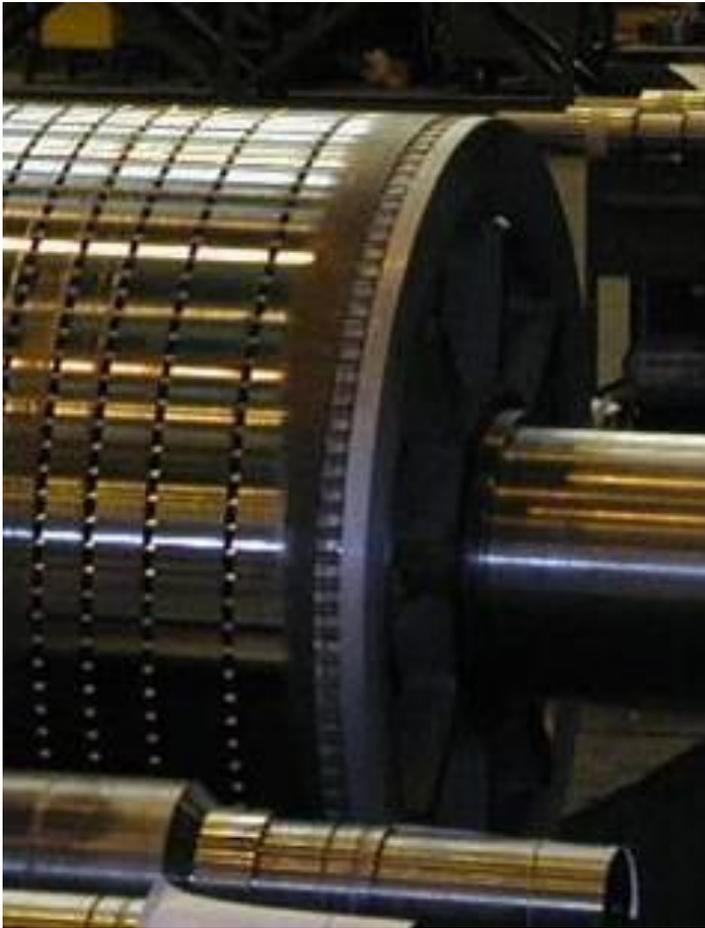
Nel caso di gabbia in alluminio, l'anello è posto a contatto diretto con il pacco e funge quindi anche da piastra di pressione.

CASO DI GABBIA IN RAME



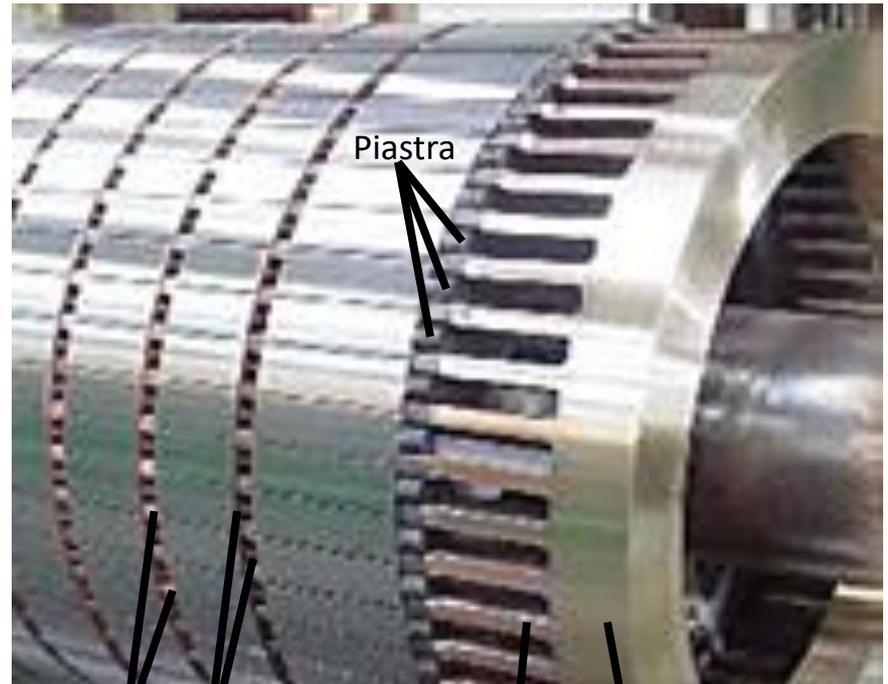
Nel caso di gabbia in rame, l'anello non è posto a contatto diretto con il pacco e deve essere usata una piastra di pressione in acciaio.

GABBIA IN ALLUMINIO



TECNOLOGIE DI SALDATURA BARRE –
ANELLO
Saldatura MIG con arco pulsante

GABBIA IN RAME

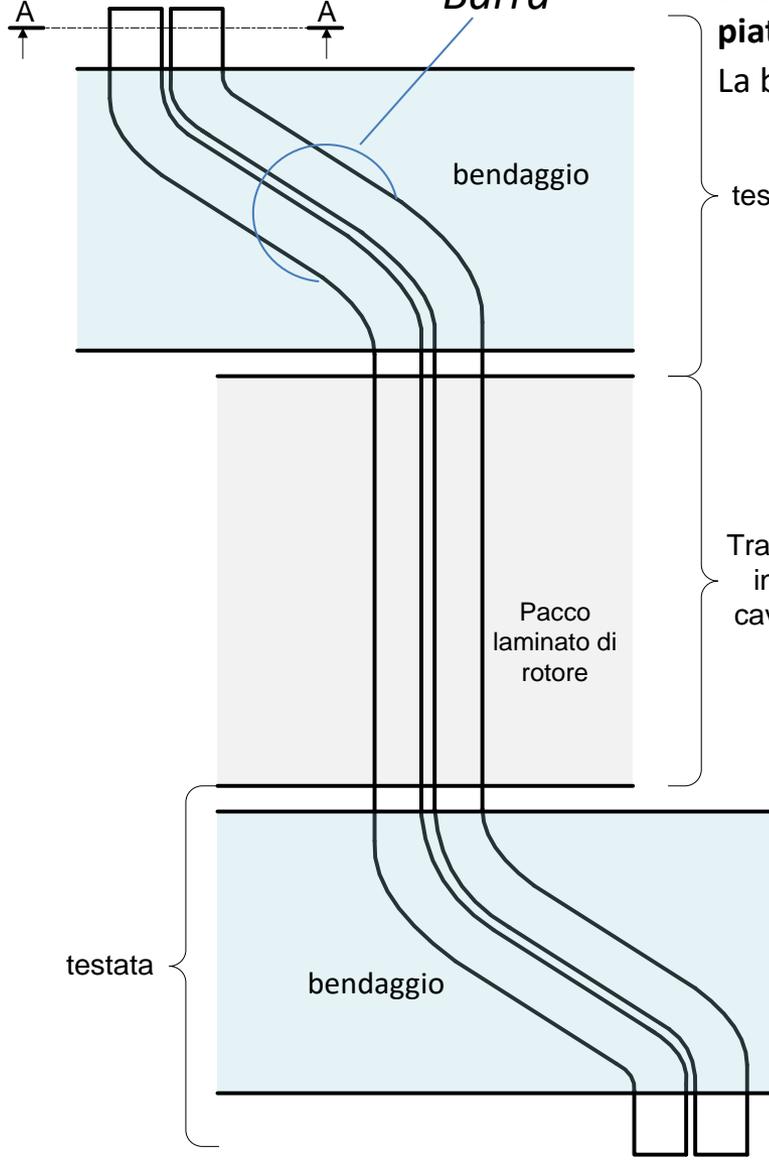


TECNOLOGIE DI SALDATURA BARRE – ANELLO
Brasatura con materiale di apporto costituita da
lega di Ag (40 % Ag)

ROTORE AVVOLTO

Sezione barra

A-A



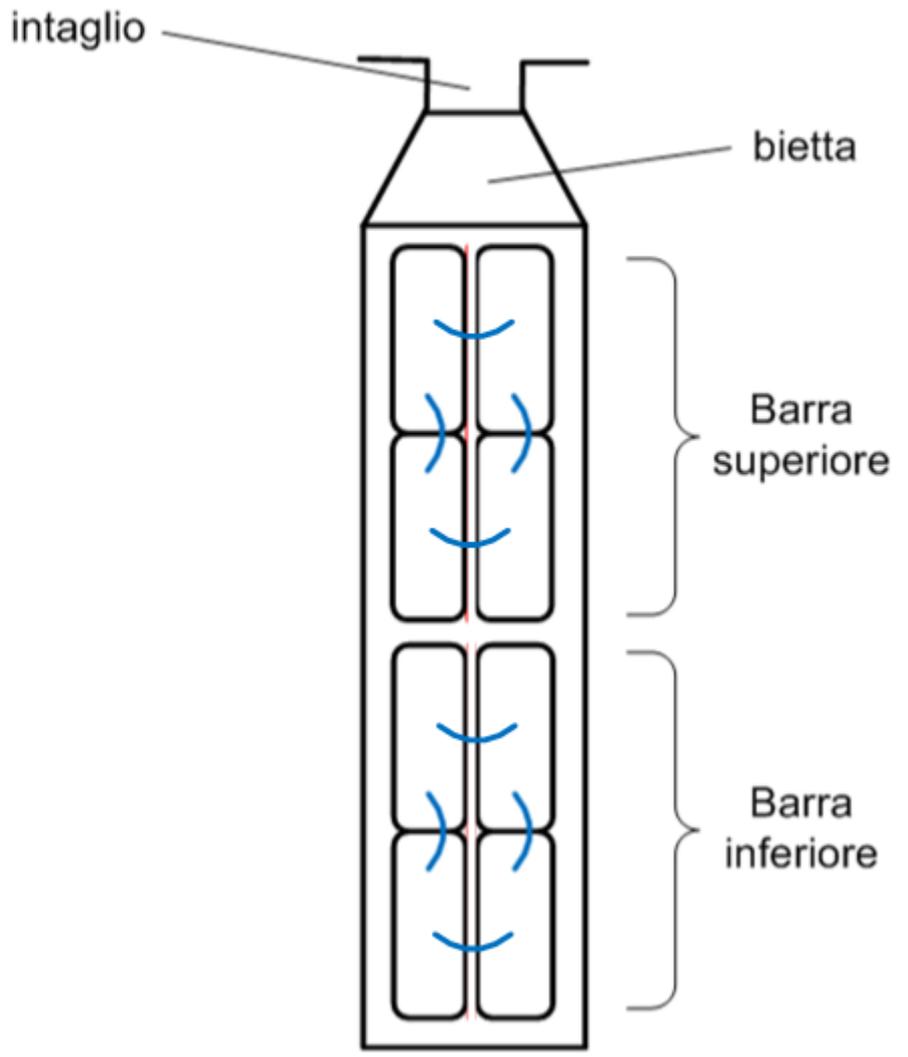
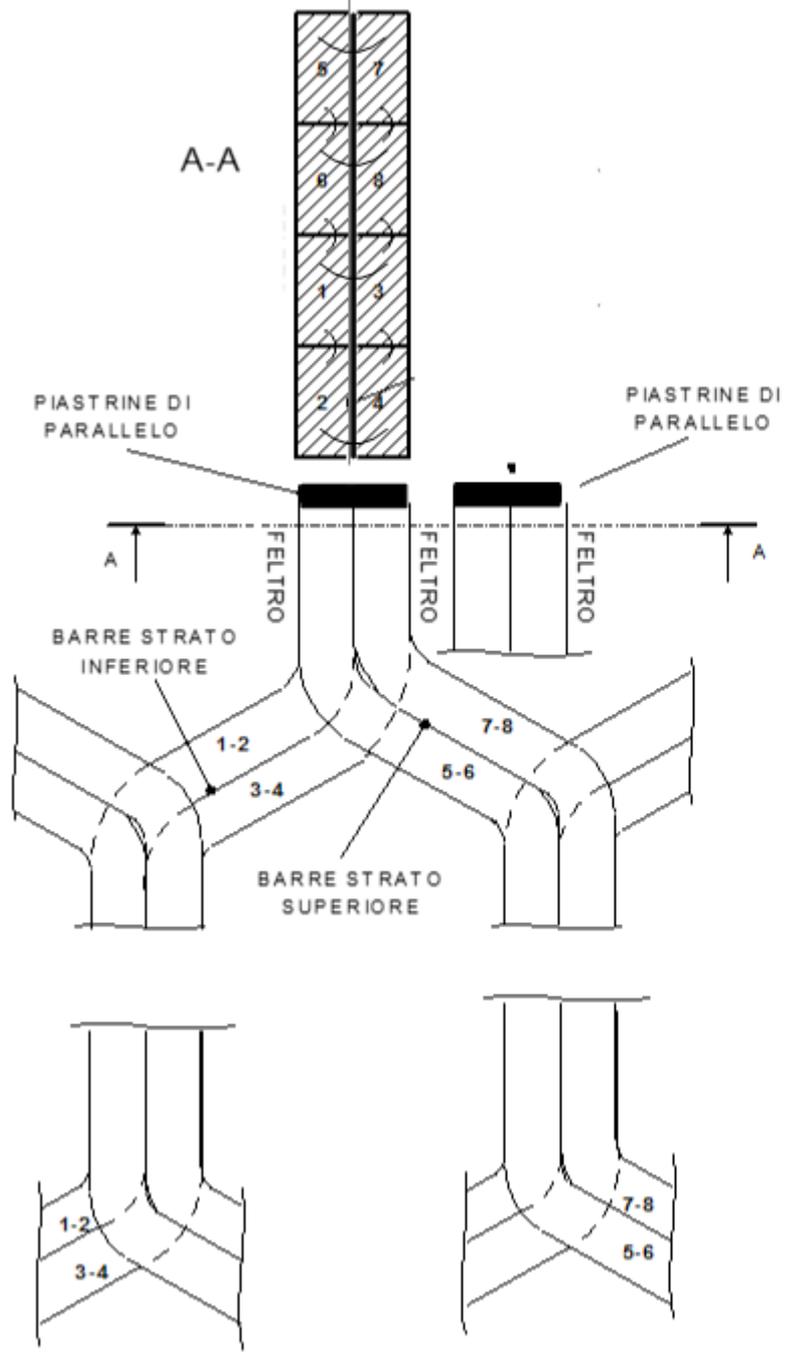
Nelle macchine asincrone con rotore avvolto, l'avvolgimento di rotore è del tipo trifase a barre, a doppio strato con passo raccorciato.

Barra = ramo di avvolgimento formato da più conduttore in parallelo. Ogni barra è formata da due piattine in parallelo, tra loro isolate. E' anche possibile (altra tecnologia) che una barra sia formata da 4 piattine tutte collegate in parallelo.

La barra viene sagomata come mostrato in figura.



bendaggio

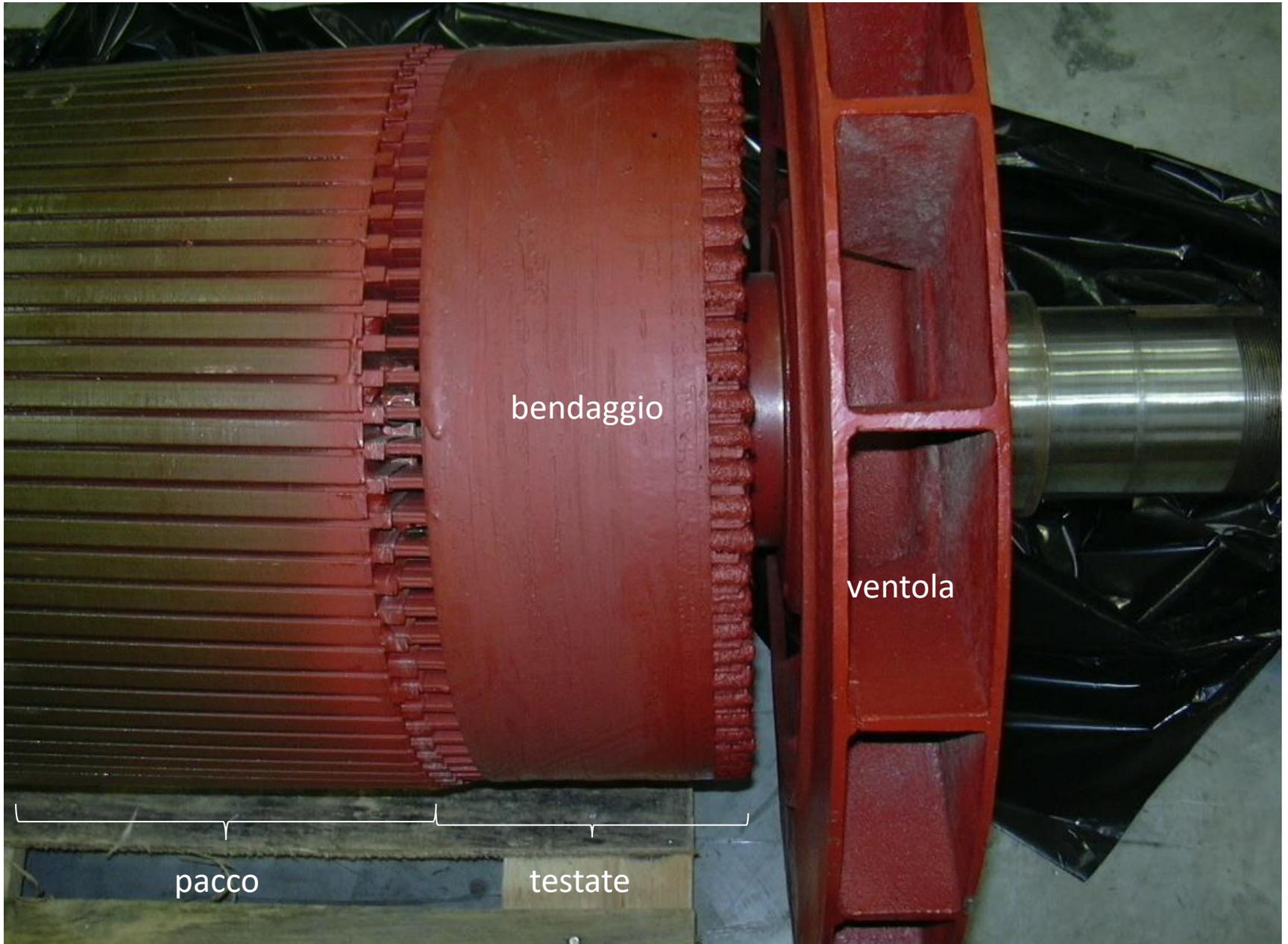


ISOLAMENTI PER ROTORI AVVOLTI

Tutti gli isolamenti hanno prevalentemente una funzione meccanica, essendo le tensioni molto basse nell'avvolgimento di rotore (poche spire).

Bendaggio in nastro "poliglass"
(vetro + poliestere)





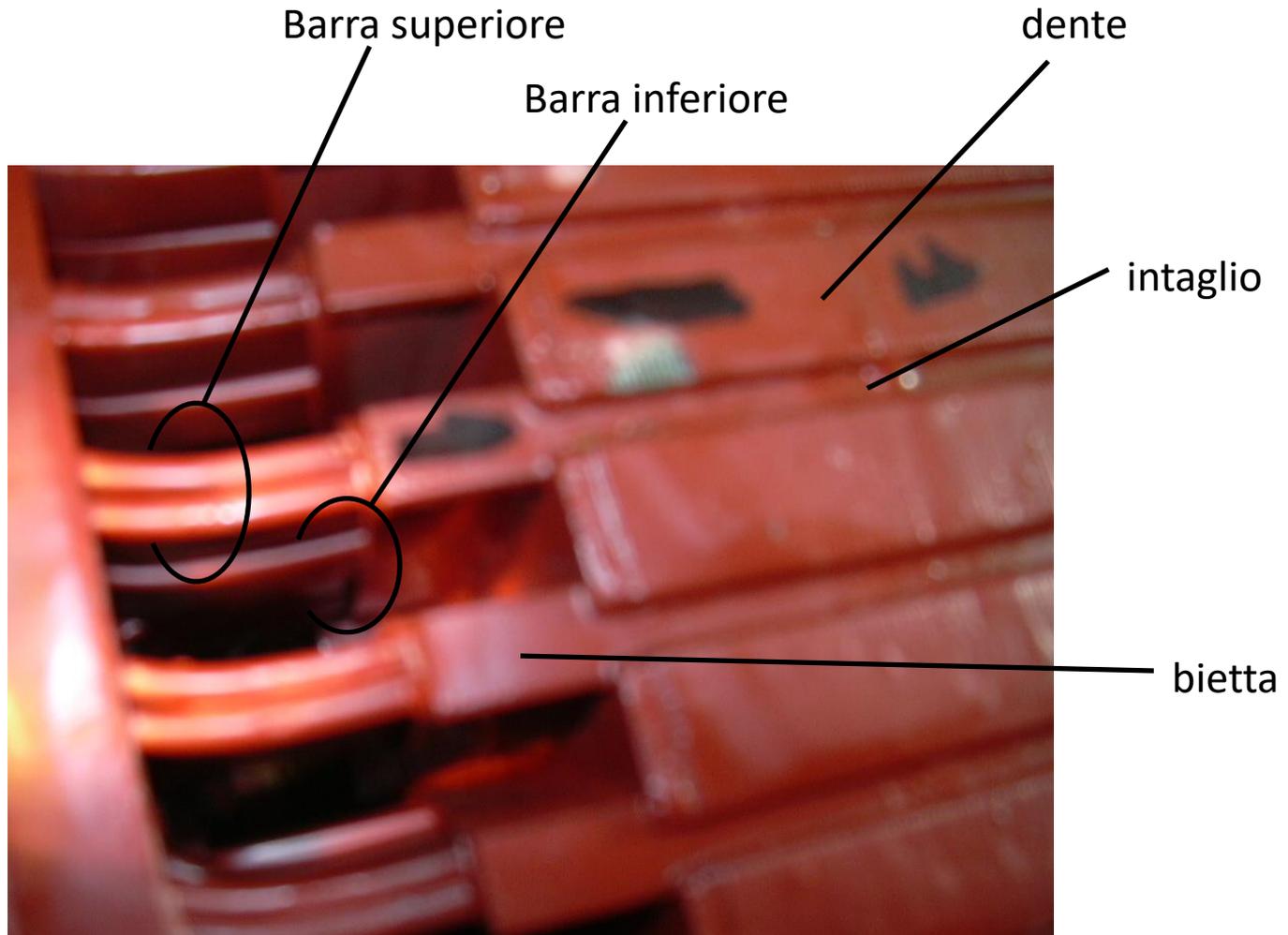
bendaggio

ventola

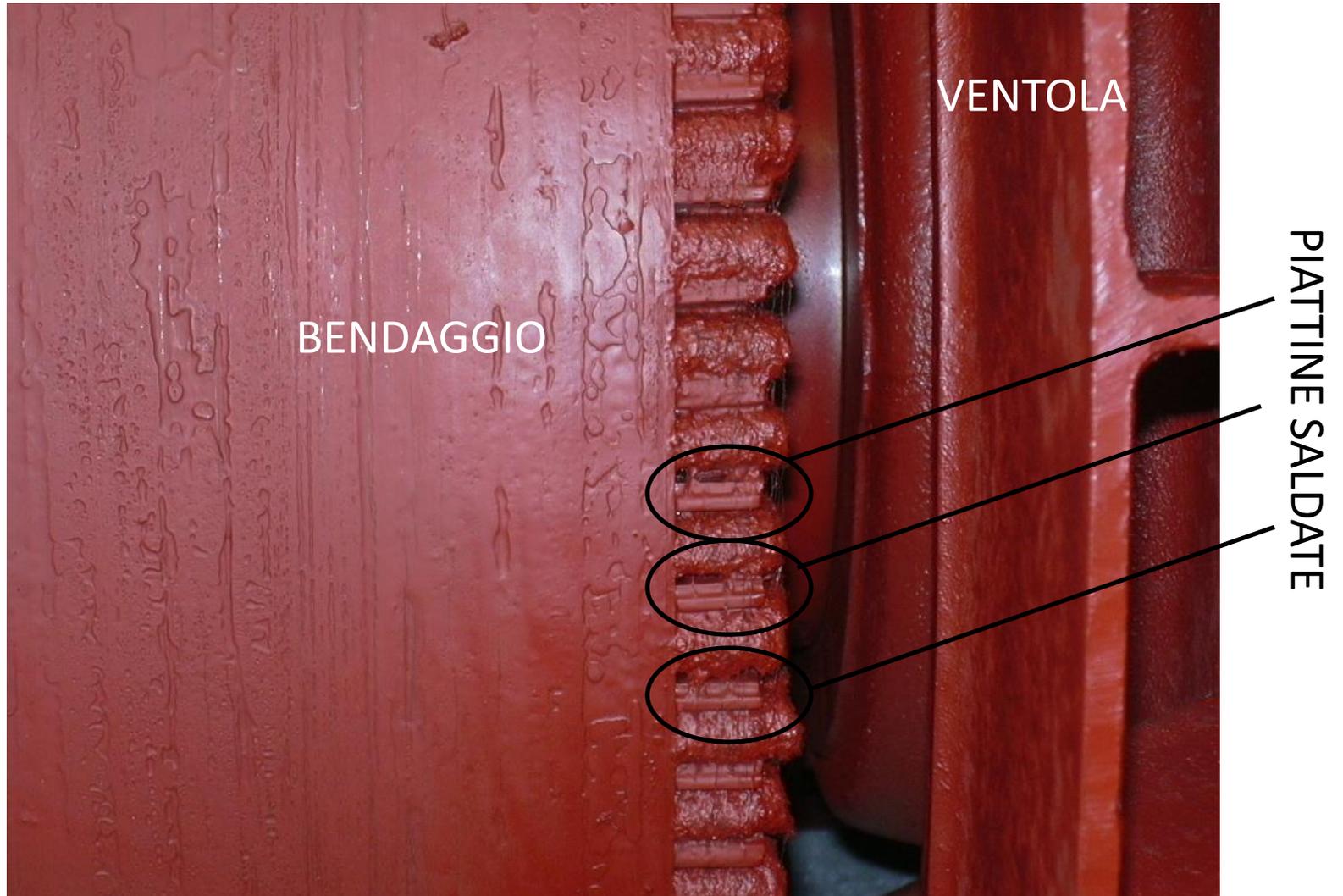
pacco

testate

DETTAGLIO BARRE ZONA USCITA PACCO

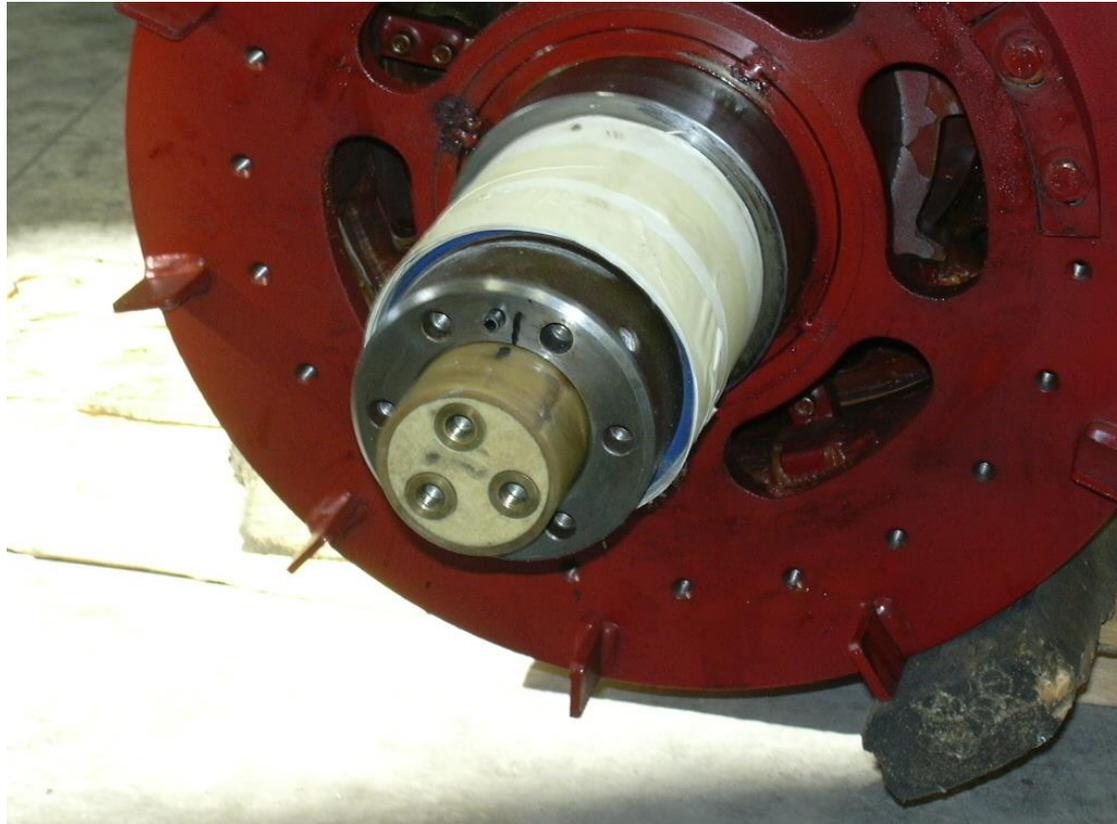


DETTAGLIO BARRE ZONA COLLEGAMENTI

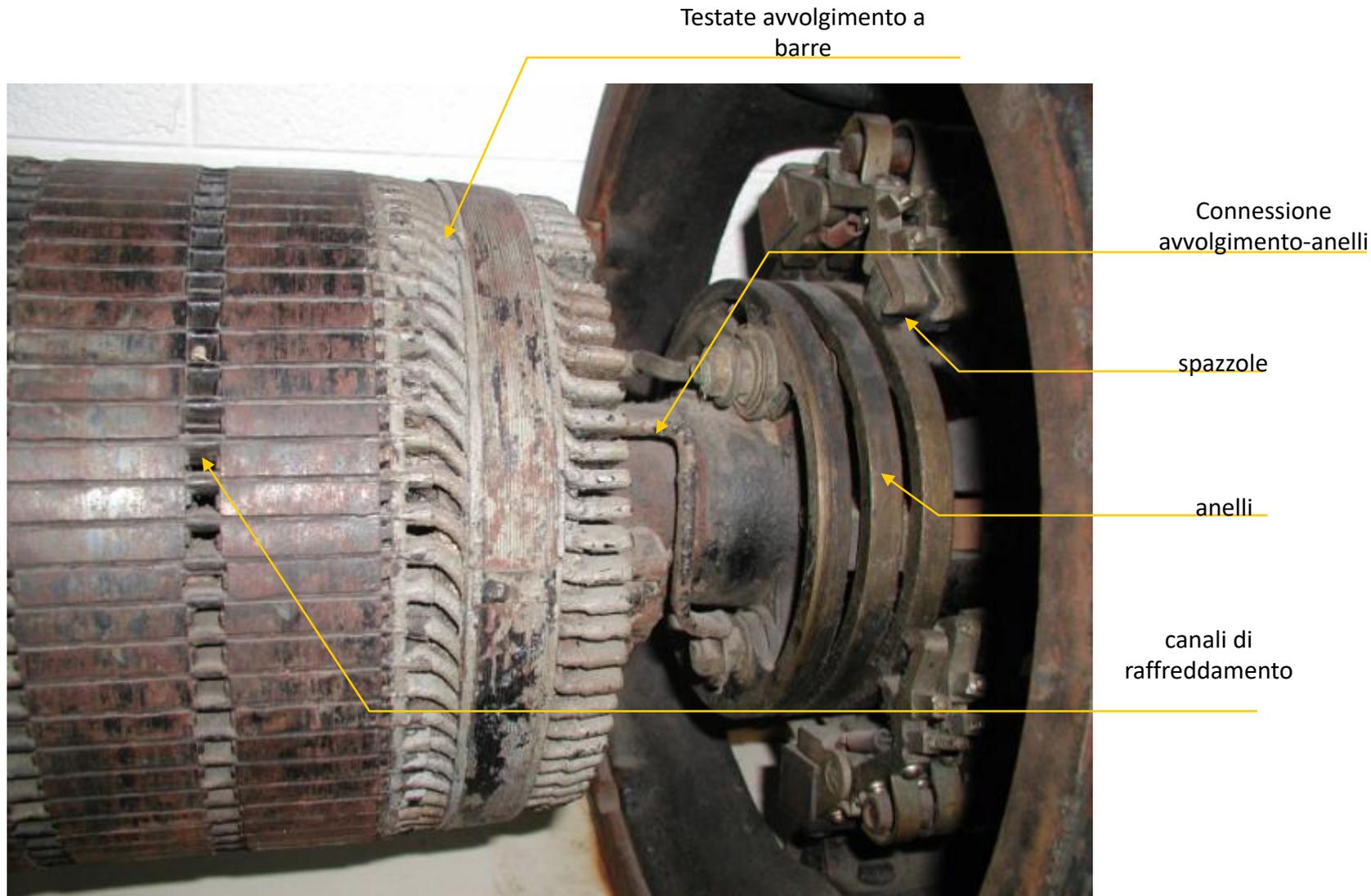


I tre terminali dell'avvolgimento trifase rotorico sono portati al sistema anelli-spazzole. I conduttori di connessione tra l'avvolgimento e gli anelli possono essere fatti passare all'interno dell'albero.

Questo consente al sistema anelli-spazzole di essere posto all'esterno della carcassa.

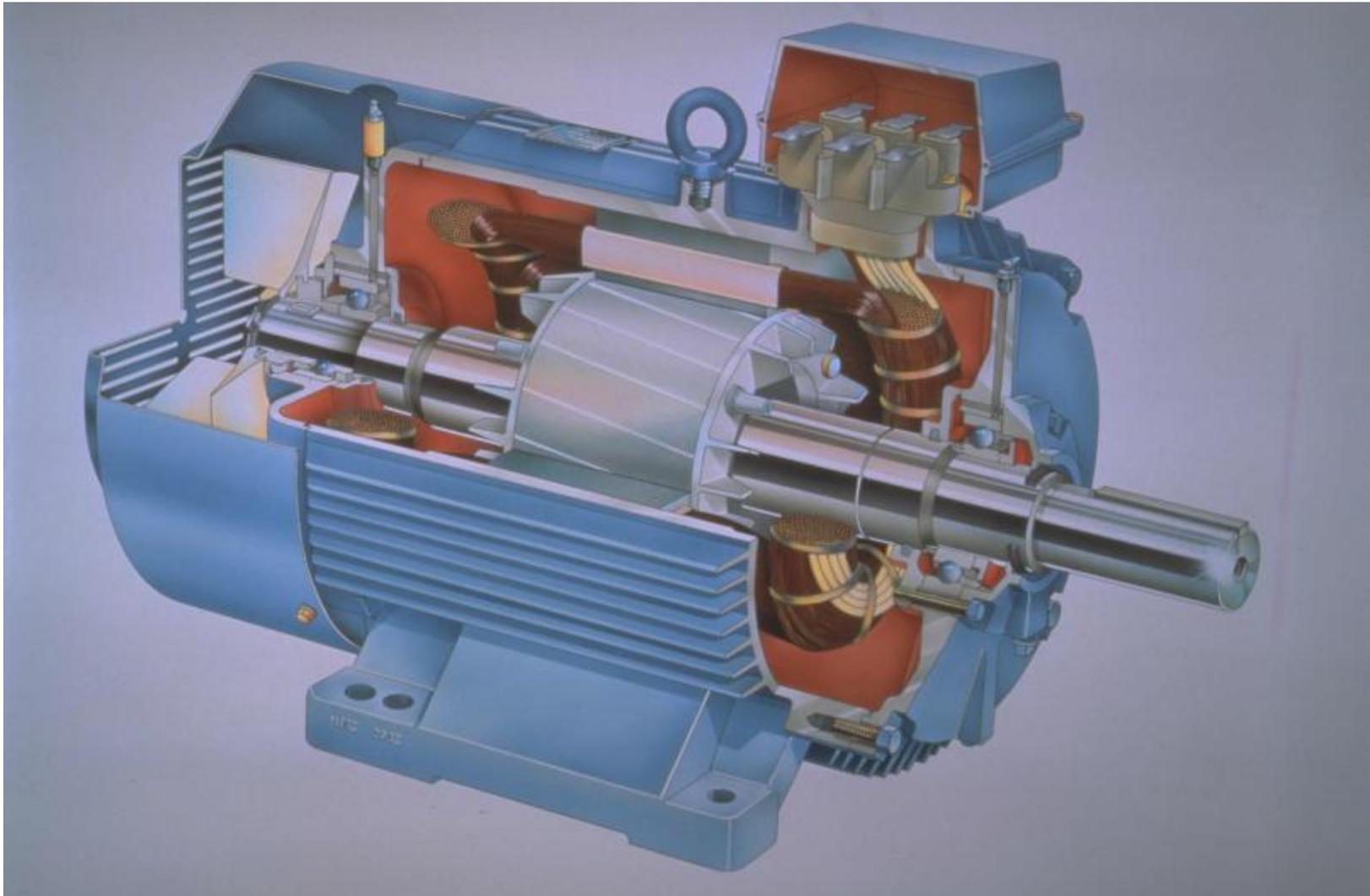


Altrimenti gli anelli e le spazzole sono posti all'interno della carcassa. In questo caso le connessioni tra avvolgimento ed anelli possono essere connessioni esterne all'albero. In ogni caso, si tratta di connessioni rotanti, quindi soggetti a importanti sollecitazioni centrifughe.



ANELLI CON ALETTE DI VENTILAZIONE

Per macchine piccole, i ventilatori possono essere sostituiti da alette di ventilazione saldate all'anello di corto circuito (oppure ottenute come parte dell'anello stesso per pressofusione).



IMPREGNAZIONE



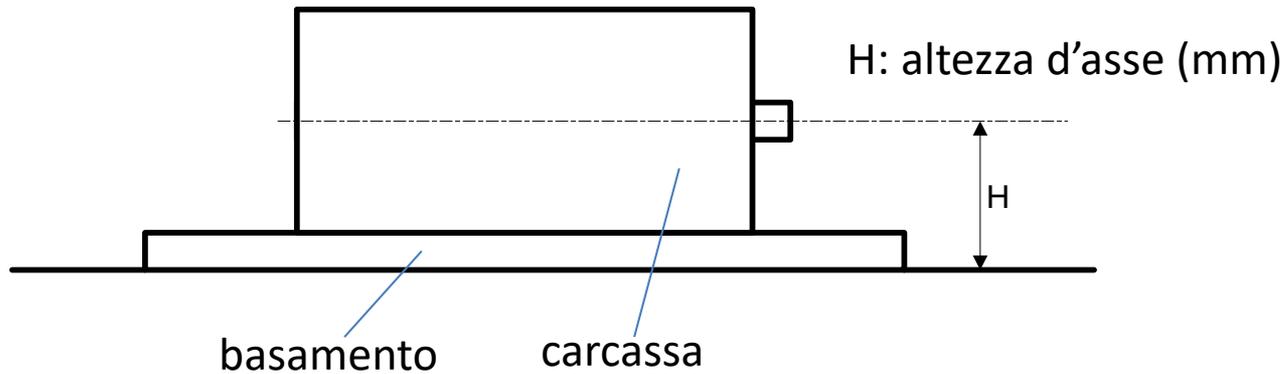
Normalmente anche il rotore, separatamente allo statore, è sottoposto ad impregnazione totale (ad esempio con tecnica VPI).

Nel caso del rotore, l'impregnazione ha soprattutto una funzione termica e meccanica:

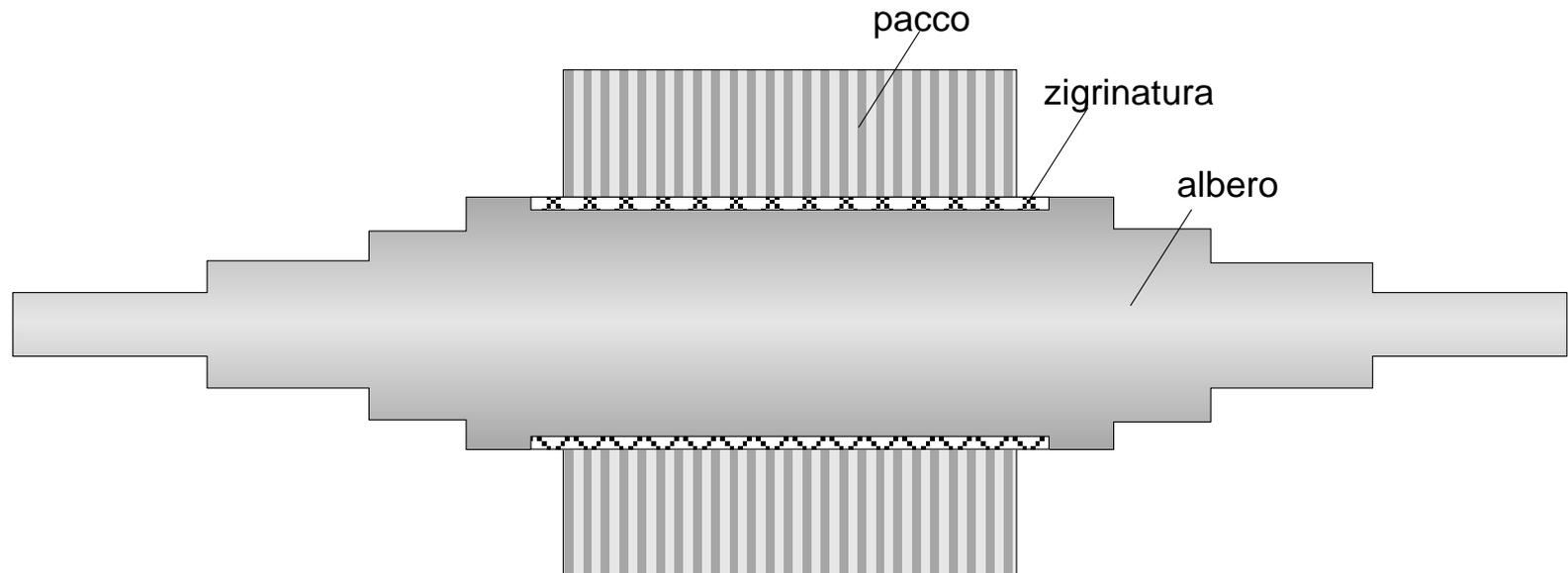
- Meccanicamente si eliminano eventuali vibrazioni dovute a giochi residui
- Termicamente si riempiono le cavità d'aria favorendo lo scambio termico per conduzione tra barre e pacco.

La funzione dielettrica dell'impregnazione è molto ridotta viste le tensioni molto basse che caratterizzano il rotore nel normale funzionamento.

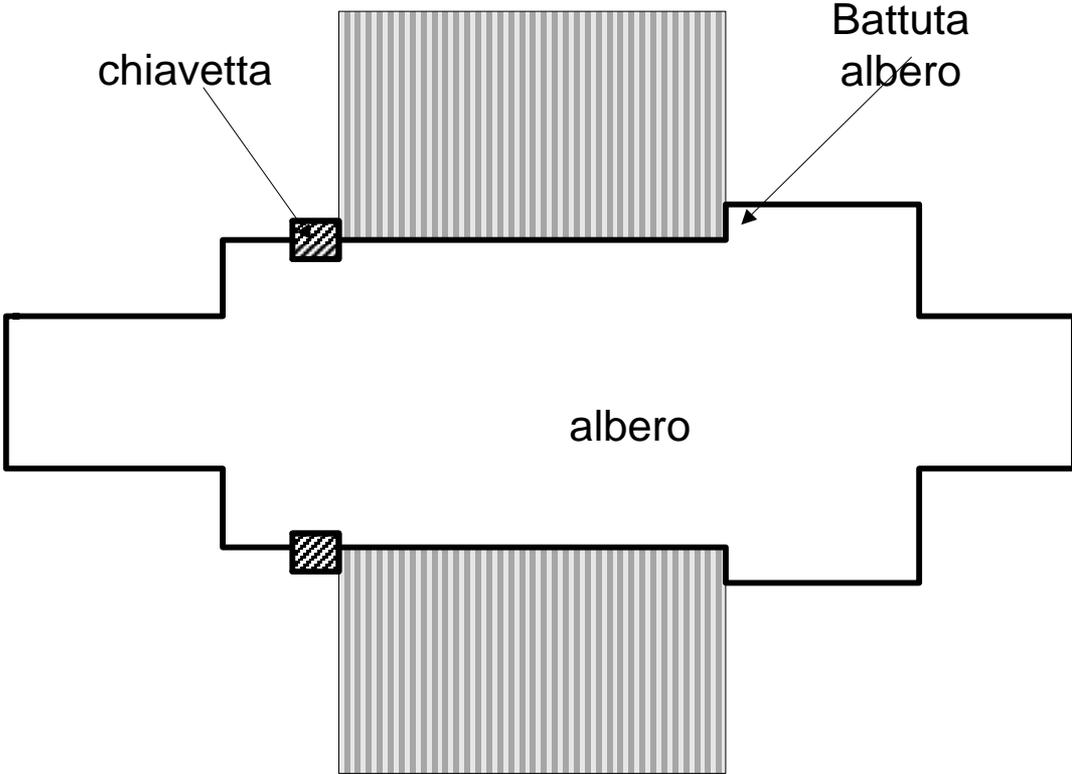
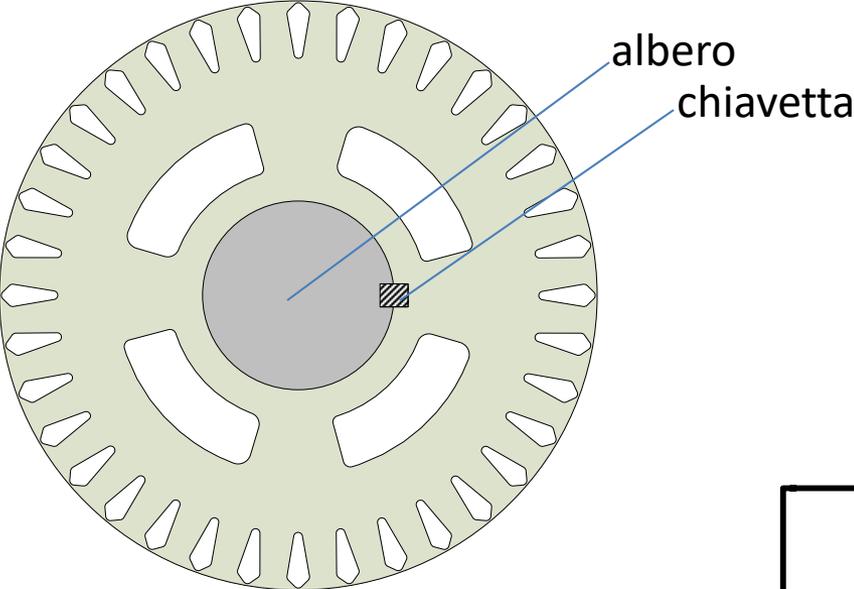
COLLEGAMENTO MECCANICO TRA PACCO ROTORICO ED ALBERO



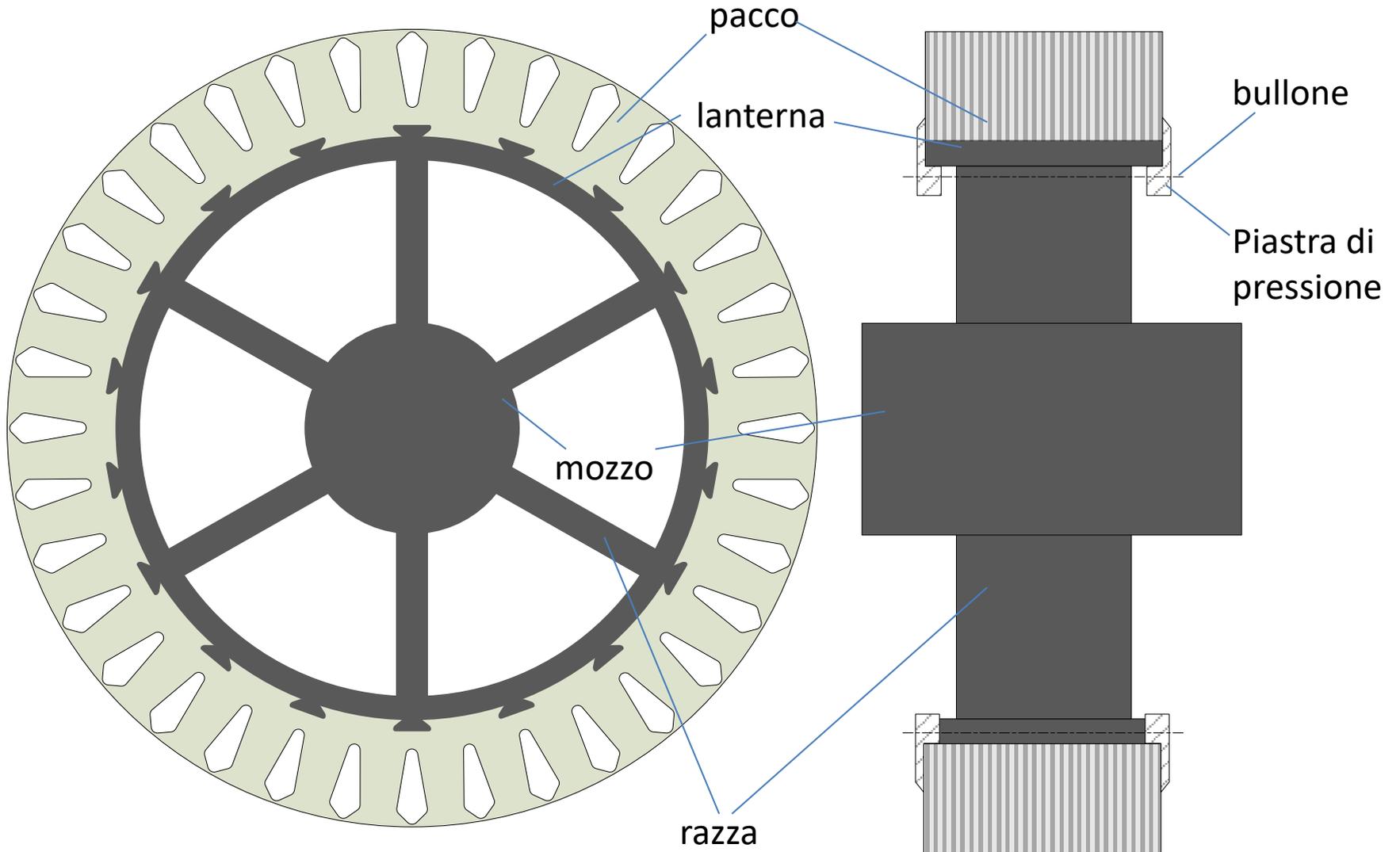
Per altezze d'asse inferiori a 630 mm si procede di solito al calettamento a caldo del pacco sull'asse raffreddato. Dopo il raggiungimento della temperatura ambiente, si crea naturalmente una interferenza meccanica.



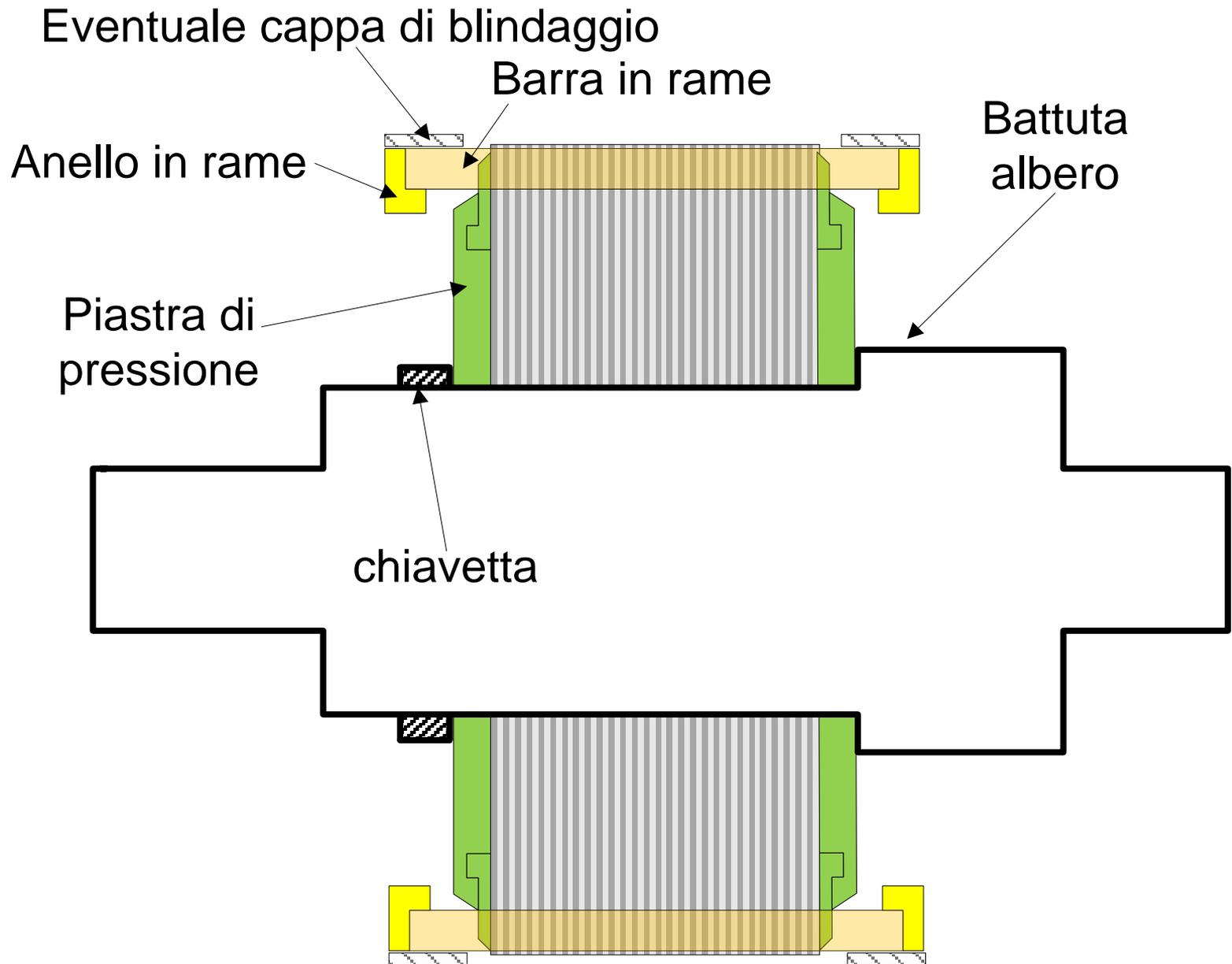
Per macchine di dimensioni maggiori si usa normalmente l'accoppiamento pacco-albero a mezzo di chiavetta per trasmissione della coppia. Per il fissaggio in senso assiale, si usa un sistema con battuta d'albero da un lato e chiavetta dall'altro.



Caso di albero razzato o a raggiera.



Caso di rotor con gabbia in rame



Per rotori con gabbia in alluminio aventi alta velocità di rotazione è necessario usare una cappa di blindaggio in acciaio amagnetico, calettata a caldo sull'anello e sulla parte terminale delle barre (sporgenti dal pacco) in modo da impedirne la deformazione per forza centrifuga.

Zona di
calettamento



18%Mn-18%Cr

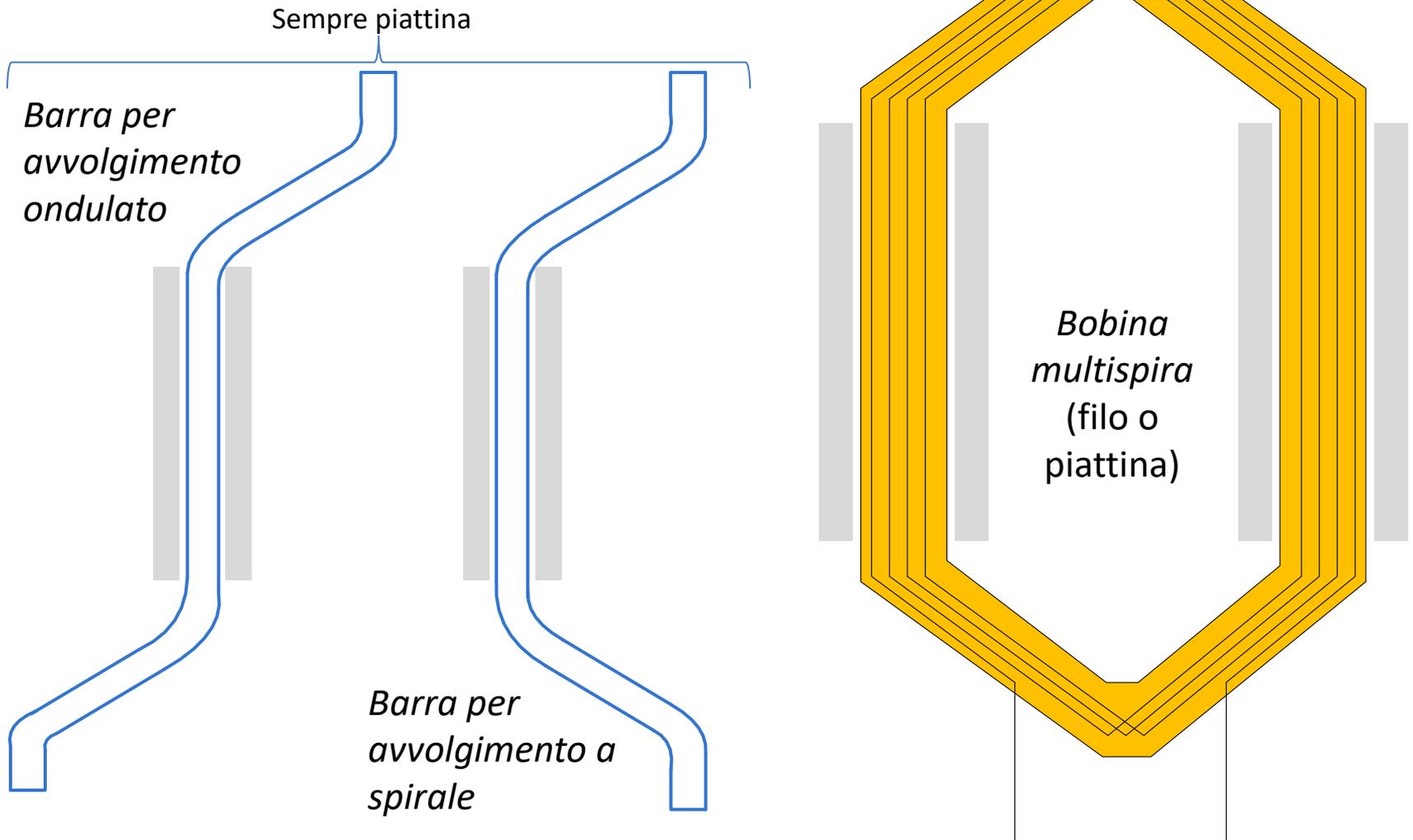
TECNOLOGIE DI AVVOLGIMENTO

Ci limiteremo a considerare, per le macchine asincrone, avvolgimenti trifase.

La tecnologia di avvolgimento trifase delle macchine asincrone verrà trattata parlando:

- 1) dei componenti che formano l'avvolgimento, che può essere formato da barre o da bobine multispira;
- 2) degli schemi di avvolgimento, cioè del modo in cui le barre e le bobine sono geometricamente disposte ed elettricamente collegate per formare le fasi.

1. Barre e bobine multispira



Una barra comprende un solo conduttore attivo (eventualmente frazionato in più conduttori in parallelo).

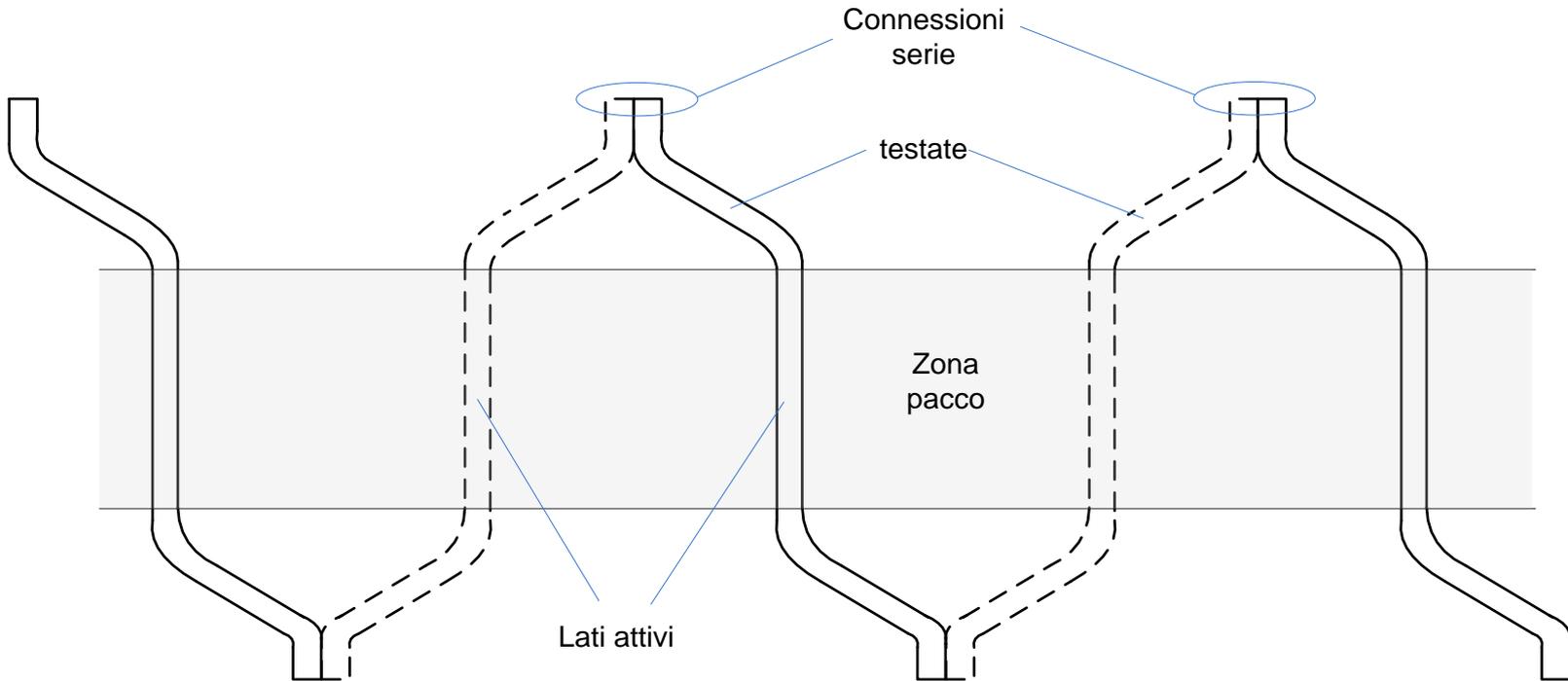
Una bobina multispira, composta da N spire, contiene $2 \times N$ conduttori attivi, ciascuno eventualmente frazionato in conduttori elementari.

La barra è un singolo conduttore o un insieme di conduttori in parallelo comprendente **un solo lato attivo**, collocato in cava, e due mezze testate; entrambi gli estremi della barra vengono connessi in serie con gli estremi di altre barre sui due lati di macchina per formare l'avvolgimento.

Le barre possono essere usate per formare avvolgimenti **ondulati** o **a spirale**.

Nelle macchine asincrone le barre sono usate solo per l'avvolgimento di rotore (nel caso di rotore avvolto), mentre lo statore è sempre a bobine multispira (avvolgimenti di statore a barre si troveranno nei grandi alternatori —specie turboalternatori).

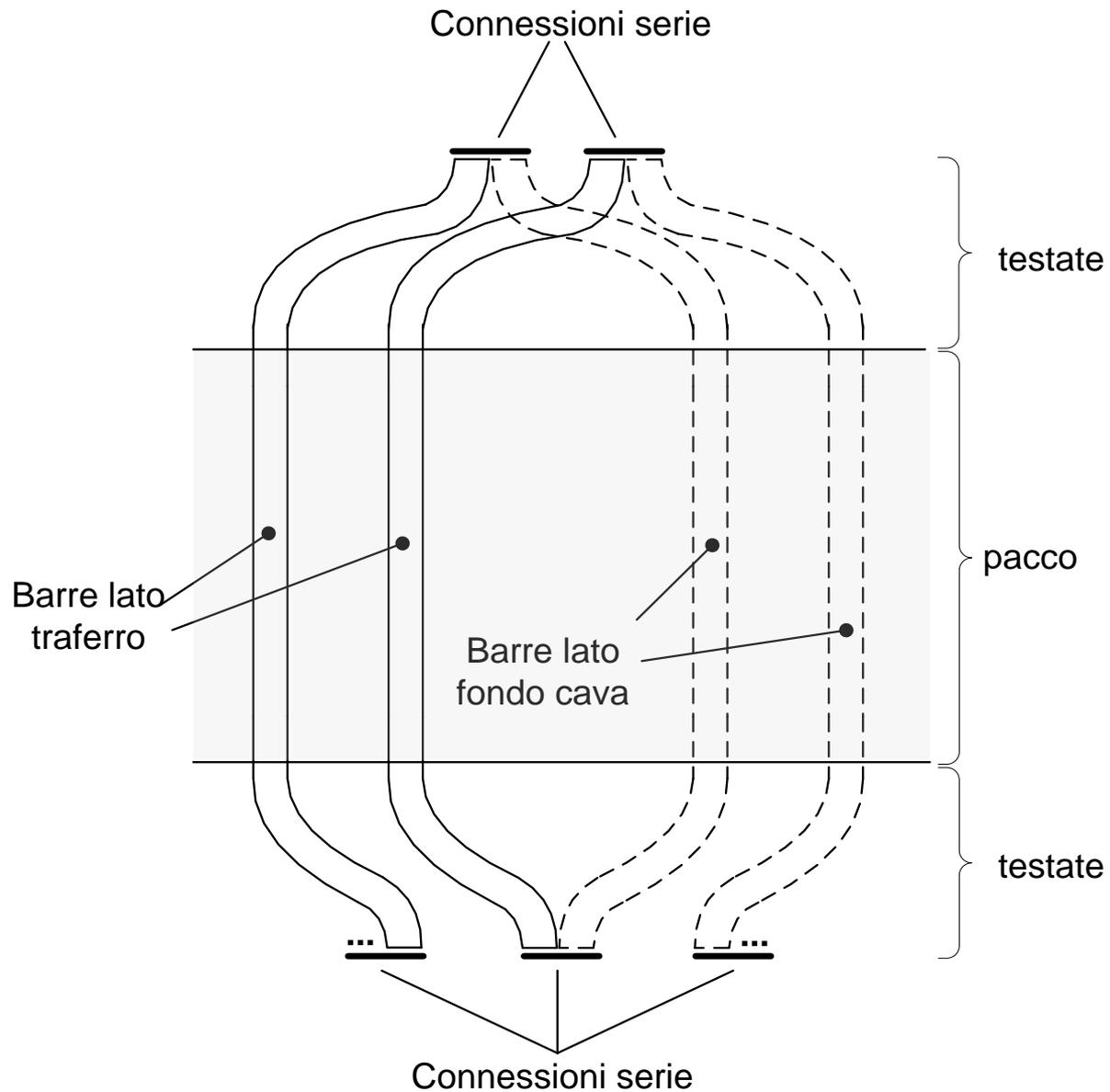
COLLEGAMENTO DELLE BARRE PER AVVOLGIMENTO ONDULATO



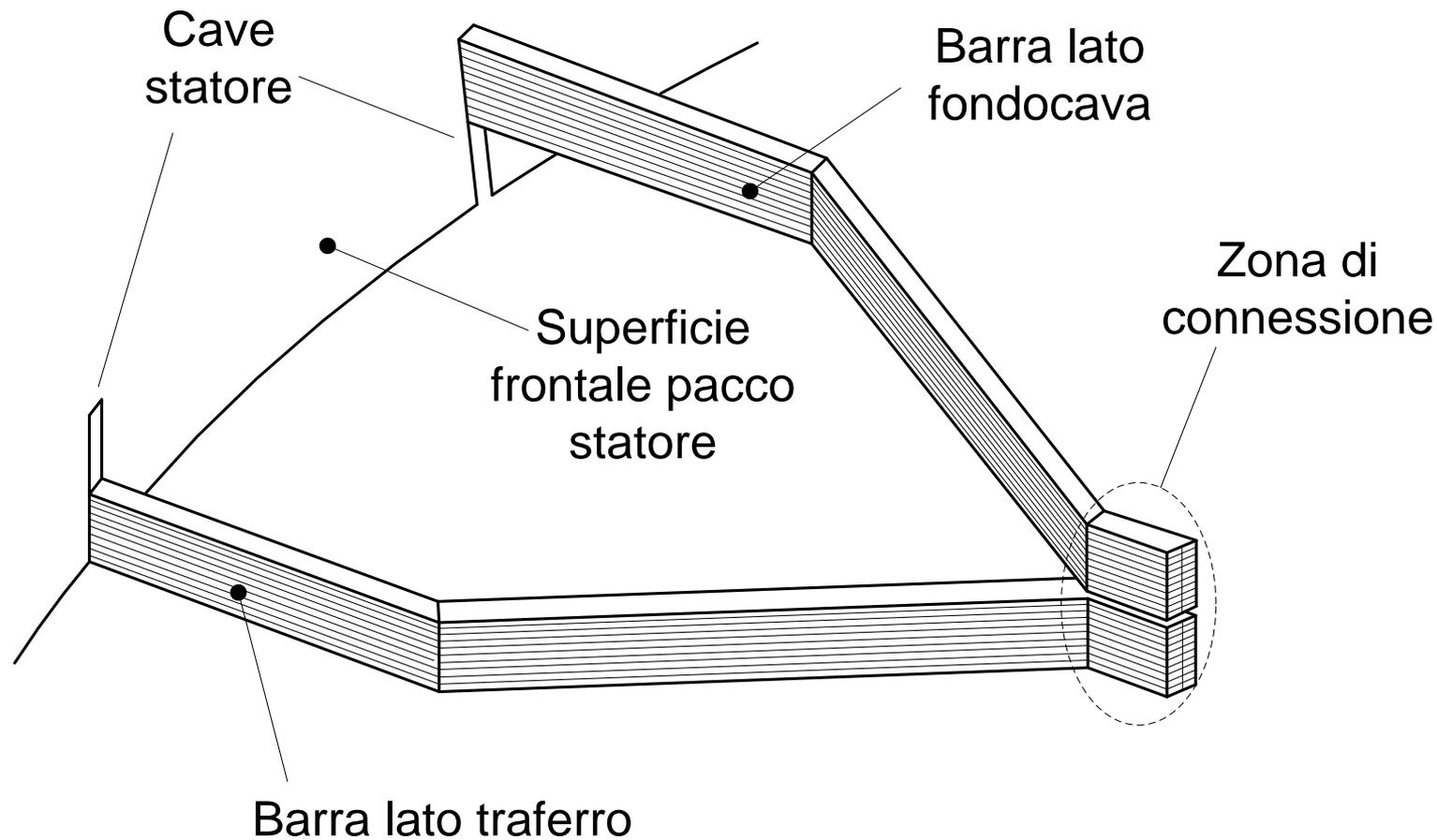
..... BARRA POSTA A FONDO CAVA

———— BARRA POSTA LATO TRAFERRO

COLLEGAMENTO DELLE BARRE PER AVVOLGIMENTO A SPIRALE



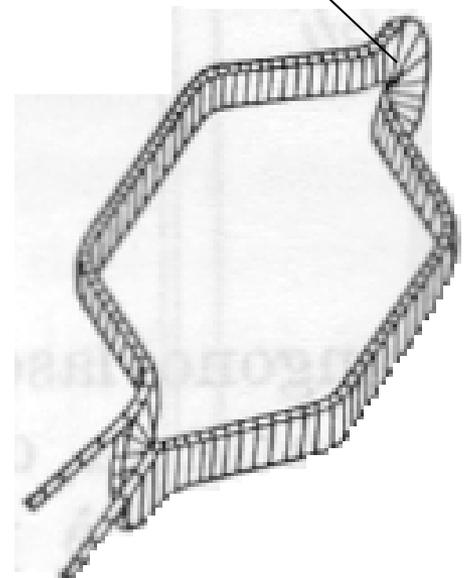
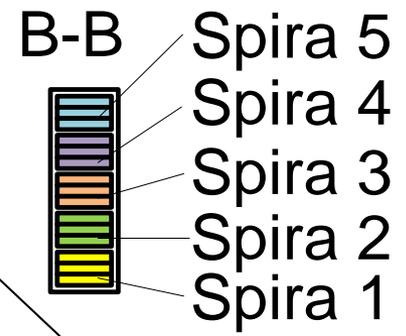
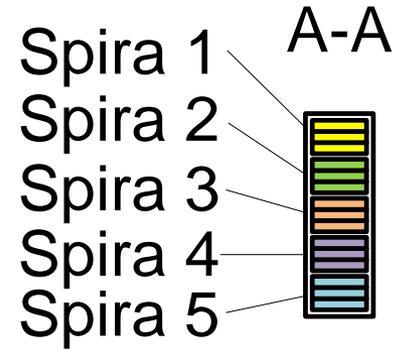
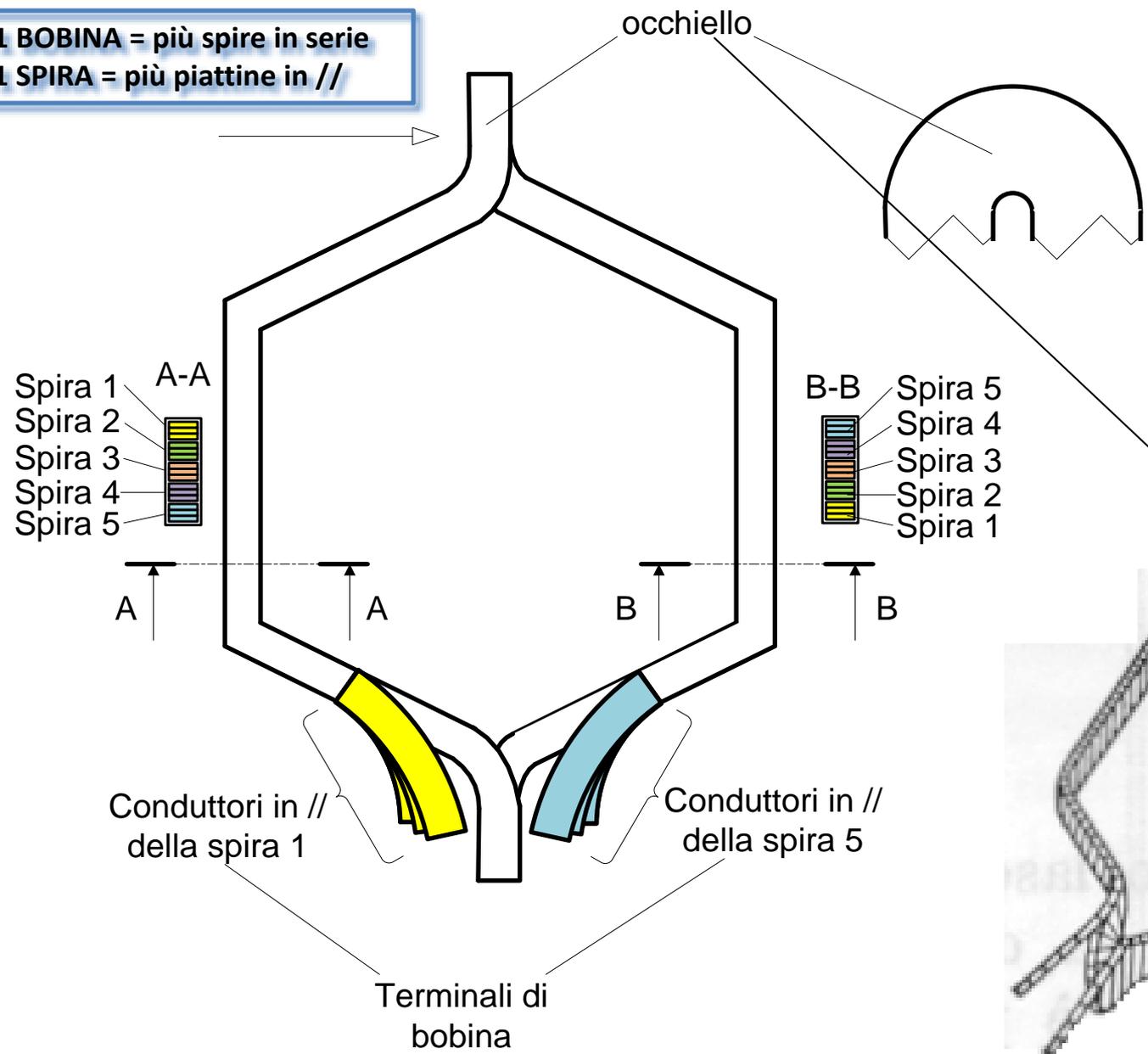
CONNESSIONE TRA BARRE IN TESTATA (SIA PER AVVOLGIMENTO ONDULATO CHE PER AVVOLGIMENTO EMBRICATO)

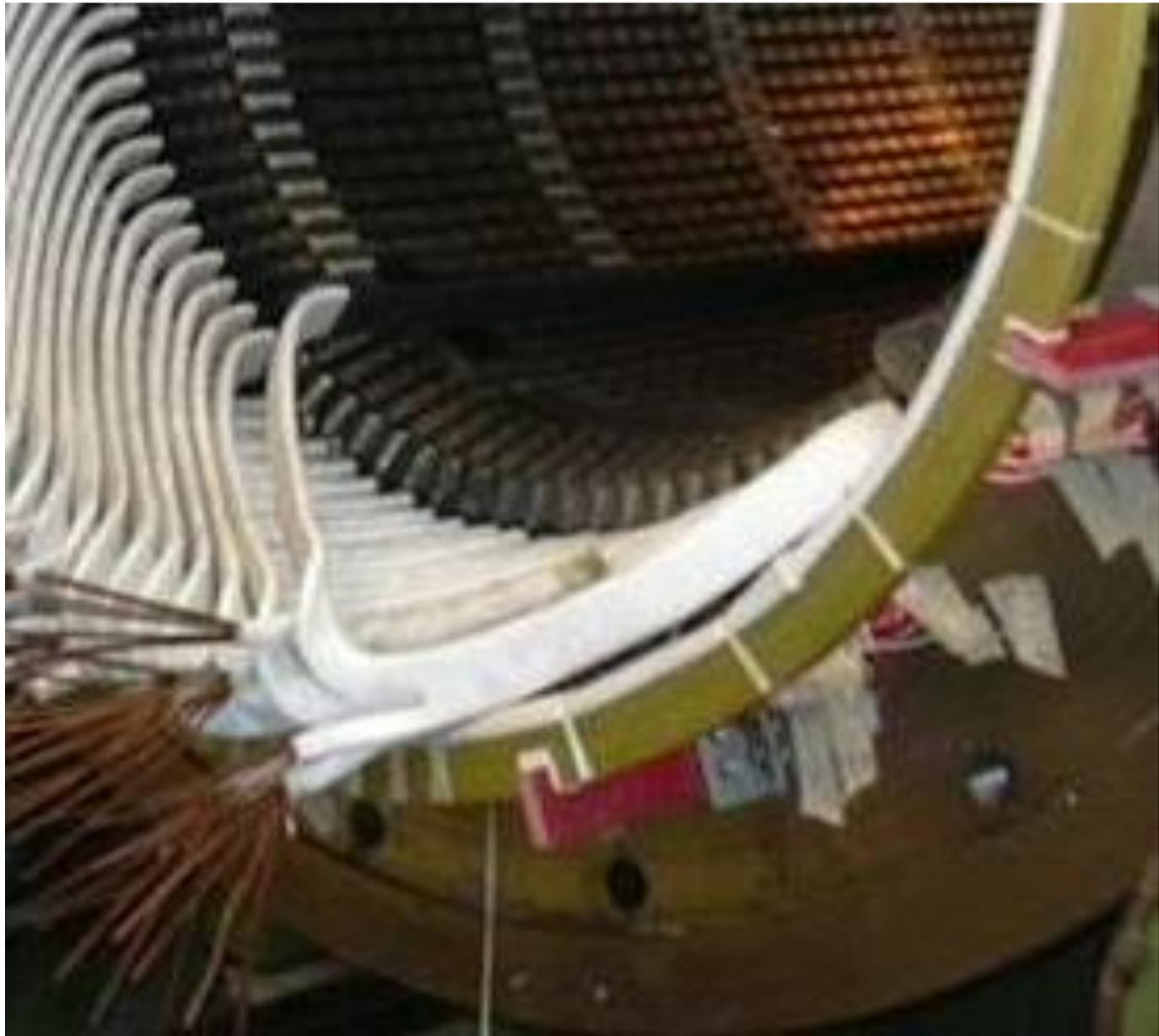


L'avvolgimento di statore delle macchine asincrone è sempre realizzato con bobine multispira, in filo o in piattina. Vediamo dapprima la bobina in piattina.

BOBINE MULTISPIRA IN PIATTINA (per avvolgimenti a doppio strato)

1 BOBINA = più spire in serie
1 SPIRA = più piattine in //





Il collegamento tra bobine avviene saldando assieme per brasatura i terminali corrispondenti.

Tale saldatura realizza:

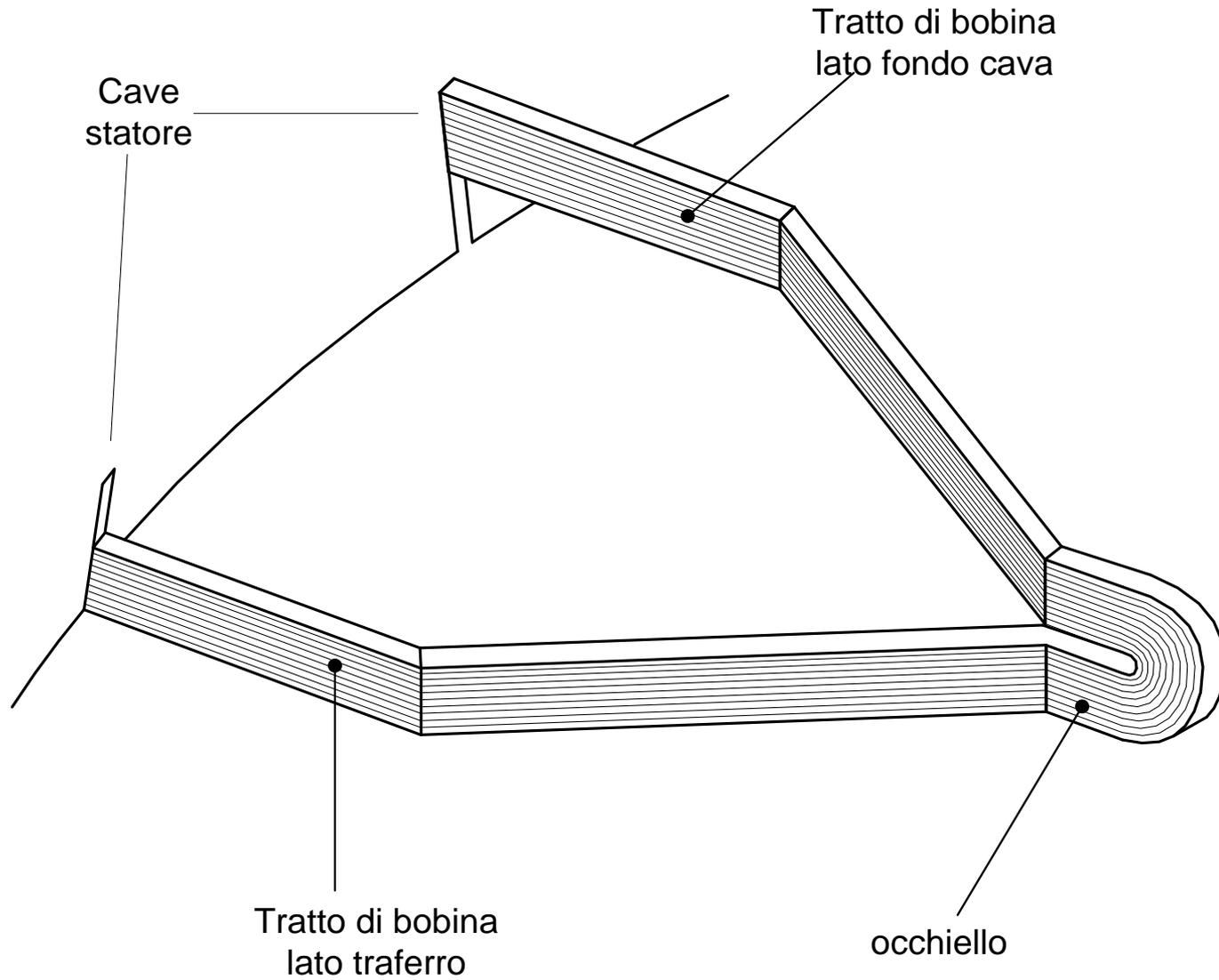
- 1) Il collegamento serie tra una bobina e quella successiva**
- 2) Il collegamento in parallelo dei conduttori elementari costituenti la spira.**



Collegamenti corti tra terminali di bobine vicine

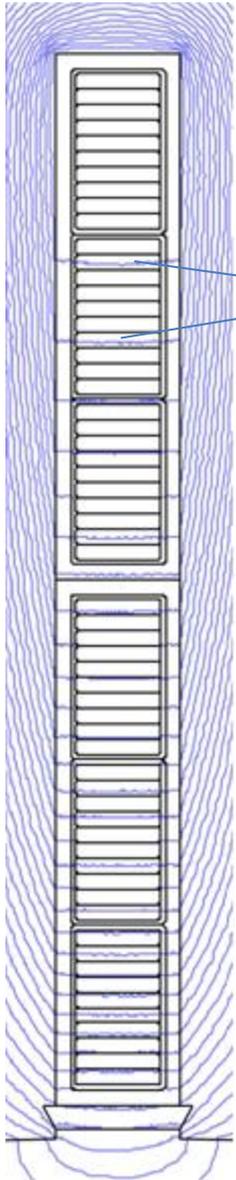
Collegamenti corti tra terminali di bobine vicine

SVILUPPO DELLA BOBINA NELLA ZONA DELLA TESTATA



DISPOSIZIONE DELLE PIATTINE NELLE BOBINE IN PIATTINE

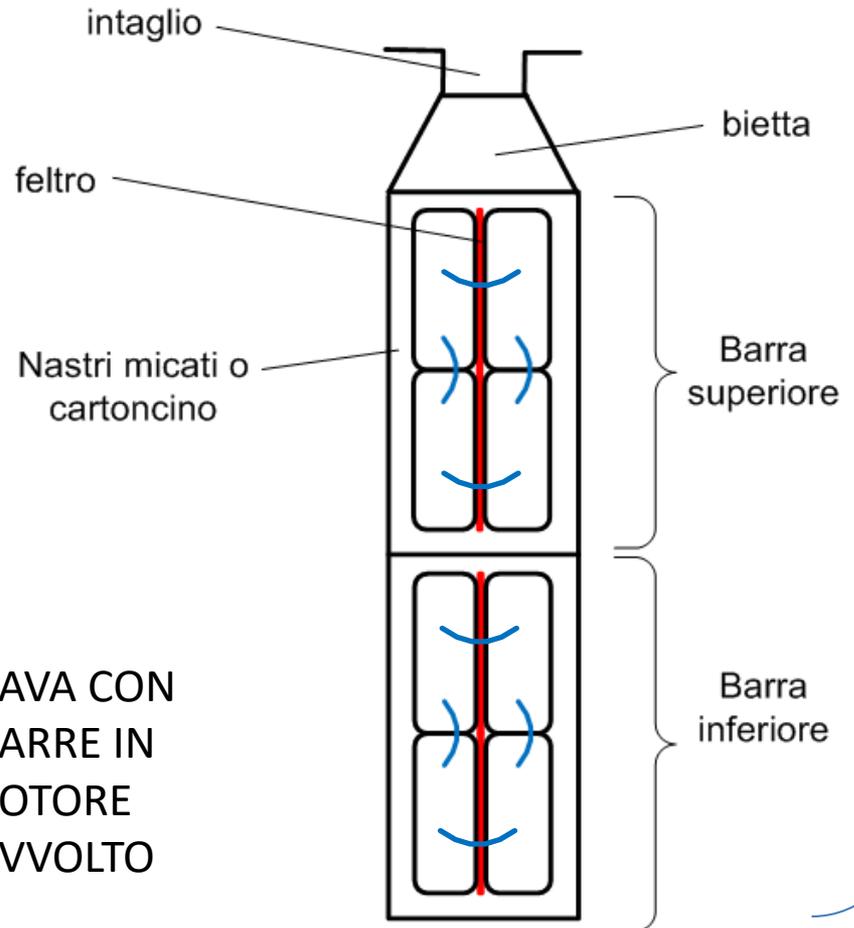
CAVA CON
BOBINE DI
STATORE



Linee di flusso
disperso in cava

Bobine di statore:
piattine parallele alle
linee di flusso in cava
per ridurre le perdite
per correnti parassite.

NOTA. Barre di rotore avvolto: per facilitare
l'inserimento di conduttori in cava, le piattine
sono disposte parallele ai fianchi di cava.
Questo è accettabile date le basse frequenze a
cui è soggetto il rotore nel funzionamento
normale-



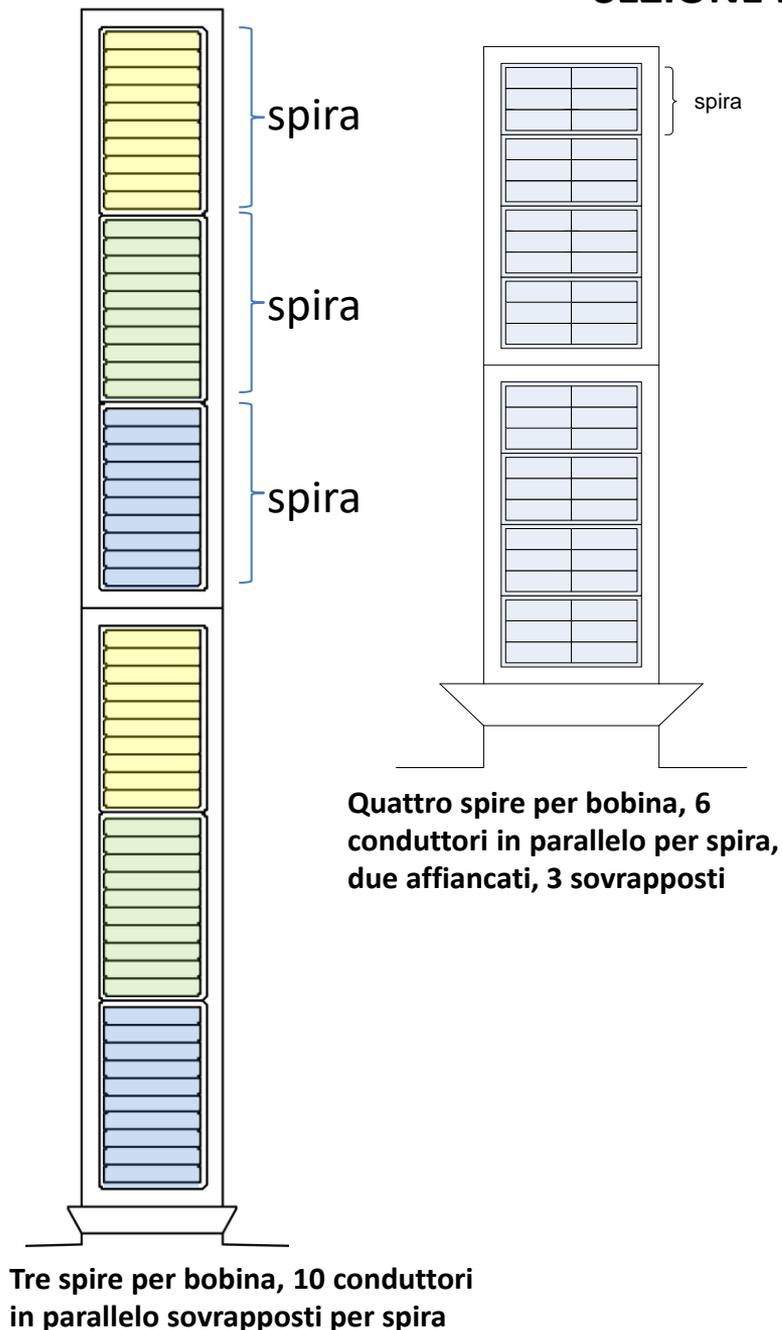
CAVA CON
BARRE IN
ROTORE
AVVOLTO

SEZIONE DI BOBINA IN PIATTINA

Ogni spira è formata da una o più piattine in parallelo. Le piattine in parallelo possono essere sovrapposte oppure sovrapposte e affiancate.

Nelle bobine di statore, per ridurre le perdite addizionali, le piattine sono sempre disposte con il lato maggiore ortogonale ai fianchi di cava, cioè parallelo alle linee di flusso disperso in cava.

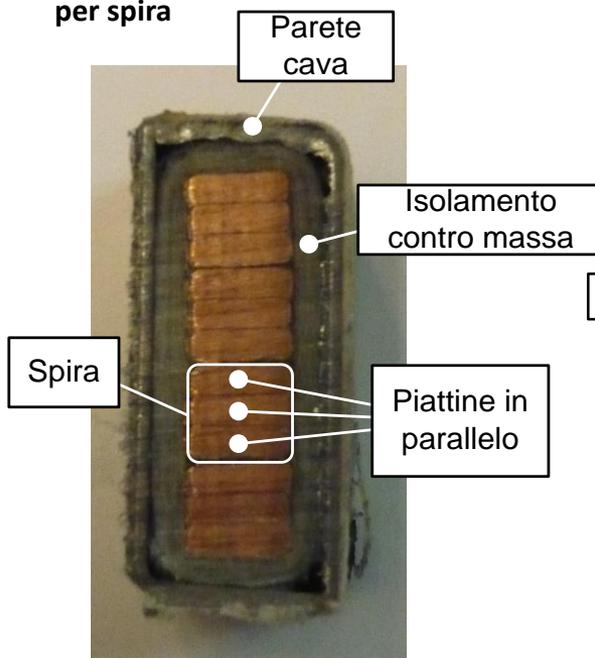
A seconda della tensione e della tecnologia, l'isolamento di spira può esserci o non esserci. C'è sempre l'isolamento contro massa (nastrature) e l'isolamento di conduttore (smalto).



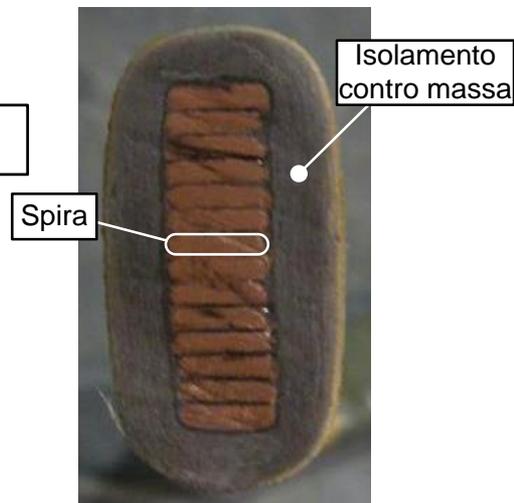
Quattro spire per bobina, 3 conduttori in parallelo sovrapposti per spira

Quattro spire per bobina, 6 conduttori in parallelo per spira, due affiancati, 3 sovrapposti

Tre spire per bobina, 10 conduttori in parallelo sovrapposti per spira



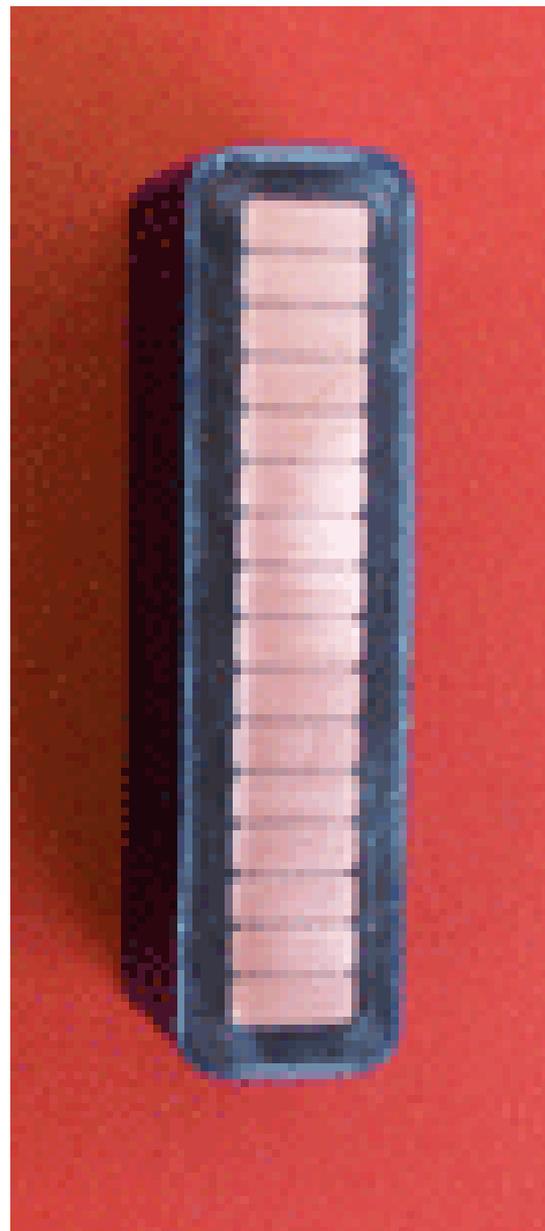
Bobina con 12 spire monoconduttore.



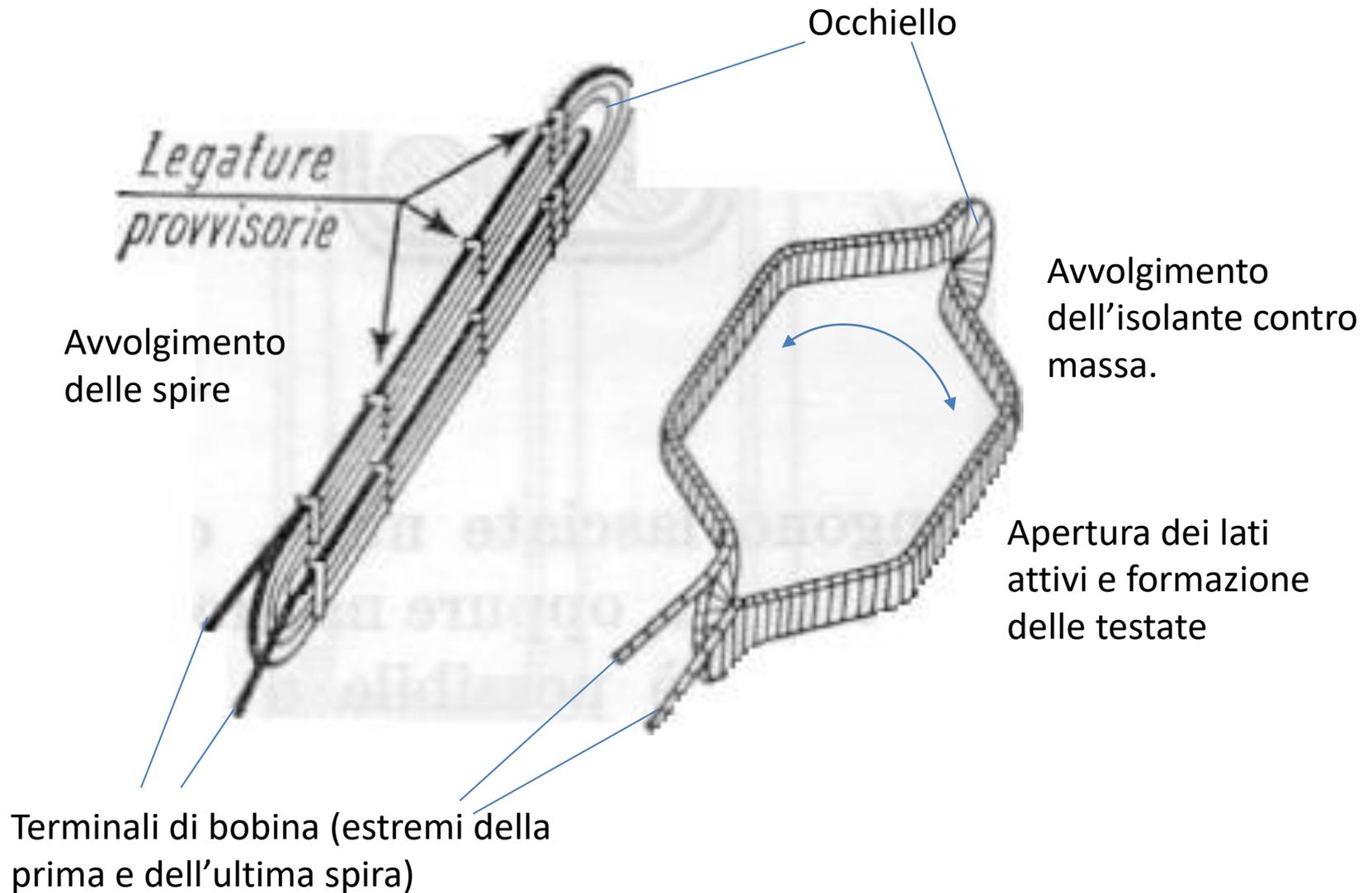
9 spire, 4
conduttori
in parallelo,
due
sovrapposti
e due
affiancati



16 spire
mono-
conduttorie



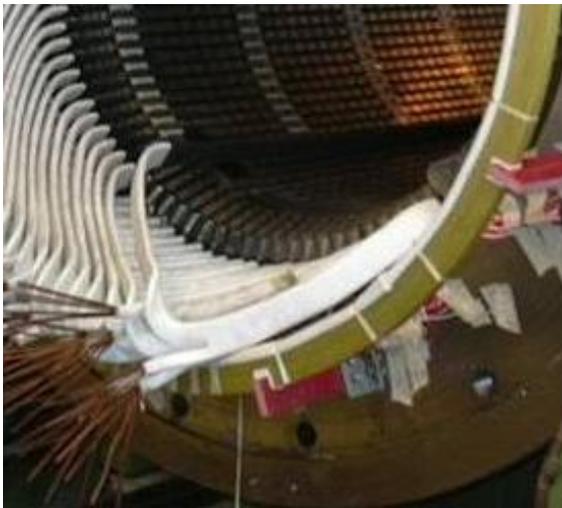
FORMAZIONE DELLA BOBINA IN PIATTINA



MONTAGGIO DELLE BOBINE IN PIATTINA



Bobine formate e nastrate prima del montaggio



Bobine in fase di montaggio



Inserimento di lato attivo di bobina in cava

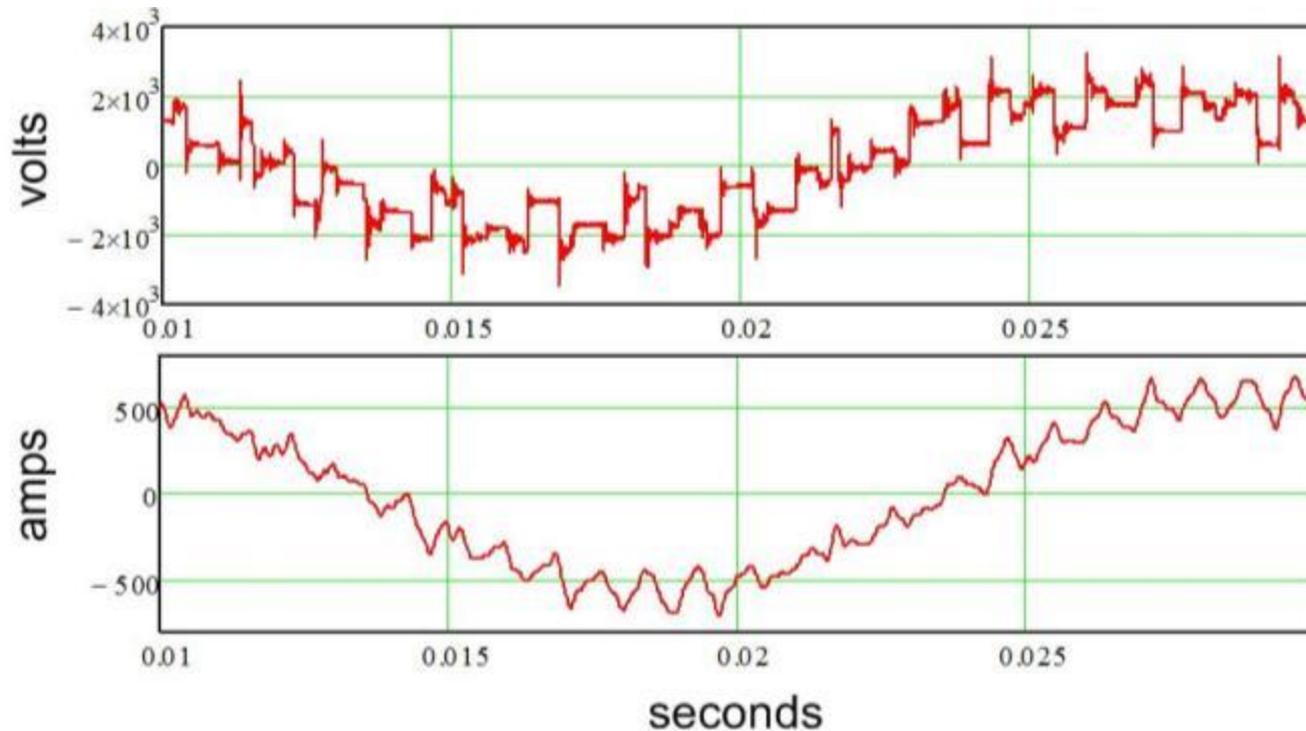
BOBINE IN FILO (MATASSE)

Carta
nomex



Per macchine piccole in bassa tensione si usano bobine in filo (matasse). La spira può essere formata da un singolo filo o da più fili connessi in parallelo. I fili sono normalmente isolati con smalto (non è previsto isolamento di spira). L'isolamento contro massa e tra lati attivi di matasse entro la stessa cava è formato con carta Nomex inserita nella cava prima di formare l'avvolgimento.

L'avvolgimento in filo può essere critico in presenza di alimentazione dell'asincrono mediante inverter. Infatti, la tensione di alimentazione dell'inverter contiene "spikes" di tensione in corrispondenza alle commutazioni (passaggi di livello). Ogni spike si associa ad una sollecitazione impulsiva che non si distribuisce uniformemente nell'avvolgimento ma tende a concentrarsi sulle prime spire (per effetto delle capacità parassite — vedi distribuzione delle tensioni impulsive nei trasformatori). Quindi, in corrispondenza ad ogni spike, si può creare una differenza di potenziale importante tra due fili vicini, tra i quali rischia di innescarsi una scarica.



Macchine avvolte in filo ed alimentate da inverter richiedono quindi un particolare rinforzo dell'isolamento.

Molti costruttori trovano conveniente usare la costruzione in piattina anche in macchine piccole in BT nel caso di alimentazione da inverter.

2. Schemi di avvolgimento

Abbiamo visto finora i “mattoni” che formano l’avvolgimento, cioè barre e bobine. Queste devono essere collegate per formare l’avvolgimento stesso.

Lo schema di avvolgimento è il modo in cui barre o bobine sono geometricamente disposte ed elettricamente collegate a formare le fasi della macchina.

Nelle macchine asincrone (e in genere nelle macchine AC) gli avvolgimenti si possono distinguere innanzitutto in due classi principali:

-a singolo strato: ogni cava contiene un solo lato attivo

-a doppio strato: ogni cava contiene due lati attivi.

L’avvolgimento a singolo strato è di uso molto limitato. Infatti:

- 1) dà problemi per l'accavallamento delle testate
- 2) costringe spesso a usare bobine diverse (concentriche) per facilitare la realizzazione delle testate (bobine diverse = complicazione costruttiva)
- 3) Non consente il raccorciamento di passo (che nel doppio strato è usato per migliorare il contenuto armonico sia del campo al traferro sia della f.e.m.).

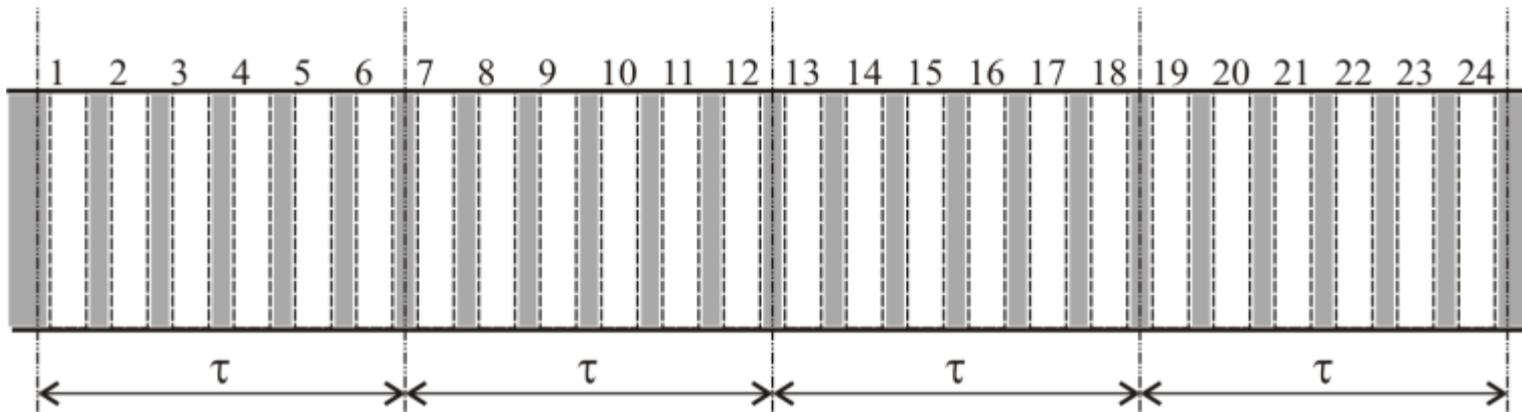
Nonostante la minore importanza, l'avvolgimento a doppio strato presenta maggiore varietà di forme costruttive (embricato-concentrico, spira lunga-spira corta, a spirale-ondulato, ecc.).

2.1 AVVOLGIMENTO A SINGOLO STRATO

E' caratterizzato dal fatto che **ogni cava contiene un lato attivo**.

Come disporre i lati attivi nelle cave?

Consideriamo la superficie interna dello statore (alternanza di cave e denti) sviluppata su un piano, ad esempio nell'ipotesi di macchina trifase con $Z=24$ cave e $P=2p=4$ poli. Definiamo con τ il passo polare.

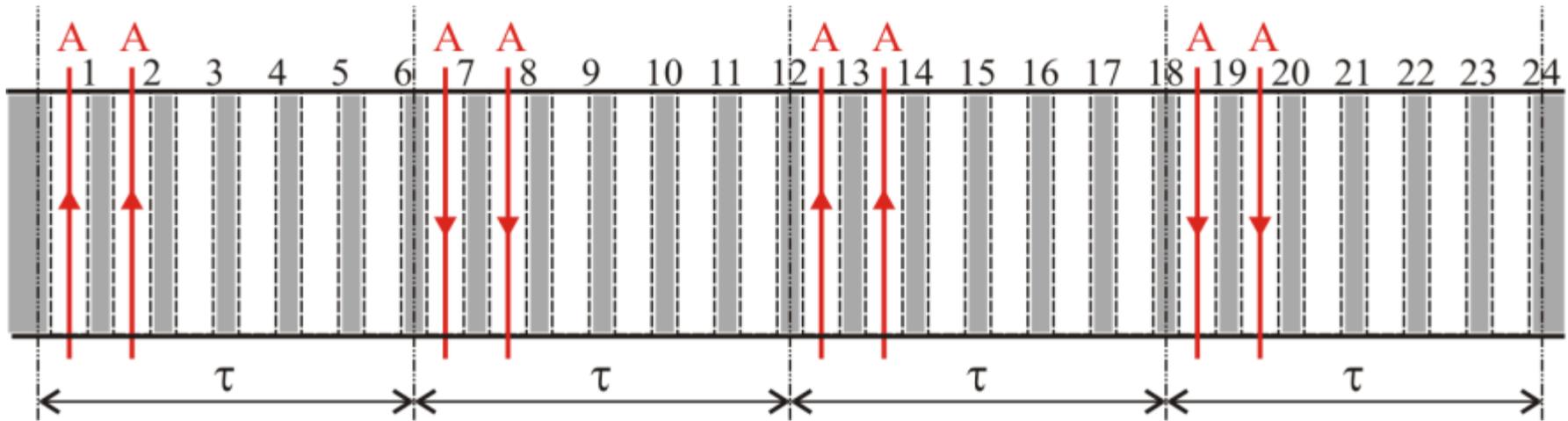


Per motivi di simmetria, le tre fasi *A*, *B*, *C* devono essere disposte in modo che tra una fase e quella successiva ci siano 120 gradi elettrici, cioè $2/3$ di passo polare.

Sempre per motivi di simmetria, è inoltre necessario che ciascuna delle tre fasi occupi lo stesso numero di cave, nel nostro caso ogni fase deve occupare $Z/3=24/3=8$ cave complessivamente.

Nel caso più semplice e comune, ogni fase occupa lo stesso numero di cave q in ogni passo polare. Il numero di cave per polo per fase è $q = Z / (3 P) = 24 / 12 = 2$.

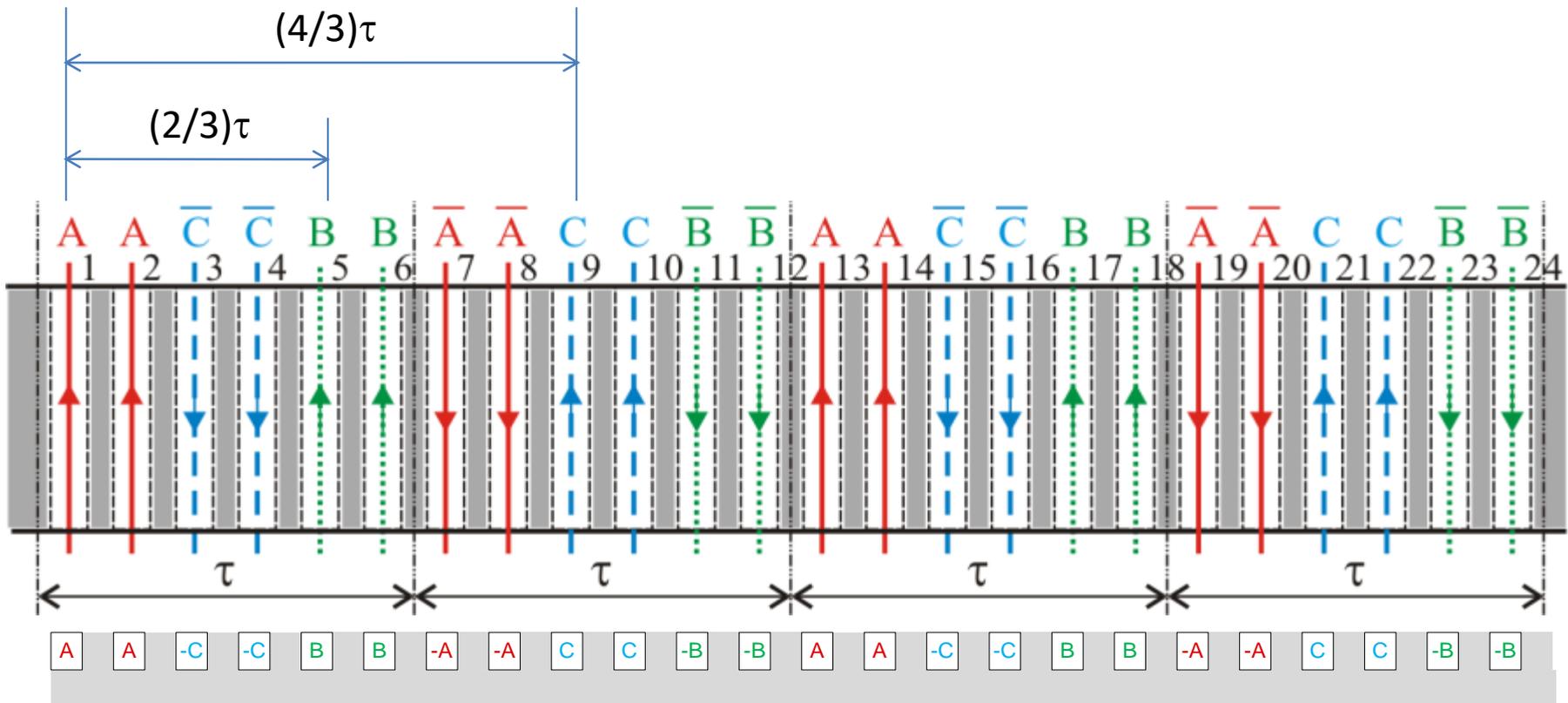
Cominciamo ad esempio con il disporre i lati attivi che competono alla fase A, supponendo che essa occupi le prime due cave di ogni polo.



Ai lati attivi che distano di un passo polare viene assegnato un verso convenzionale della corrente opposto. Questo perché la distribuzione della corrente lungo lo statore deve tendere ad una forma sinusoidale con periodo pari a 2τ , il che implica che conduttori distanti τ devono portare correnti uguali in modulo e opposti in segno.

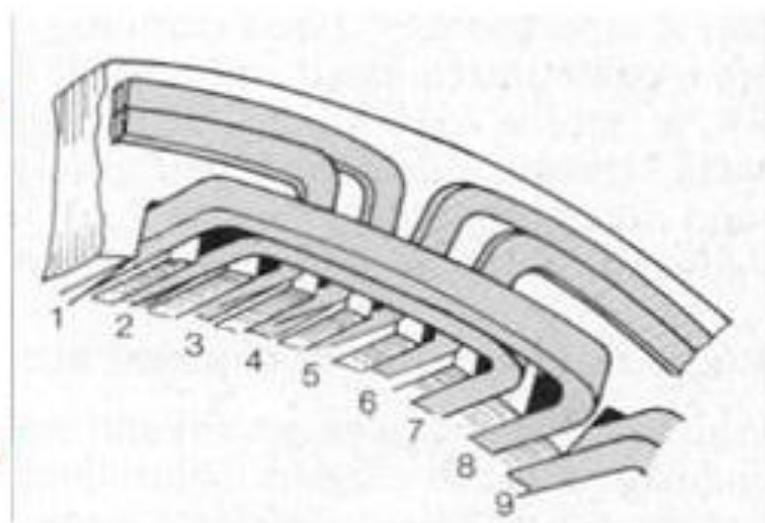
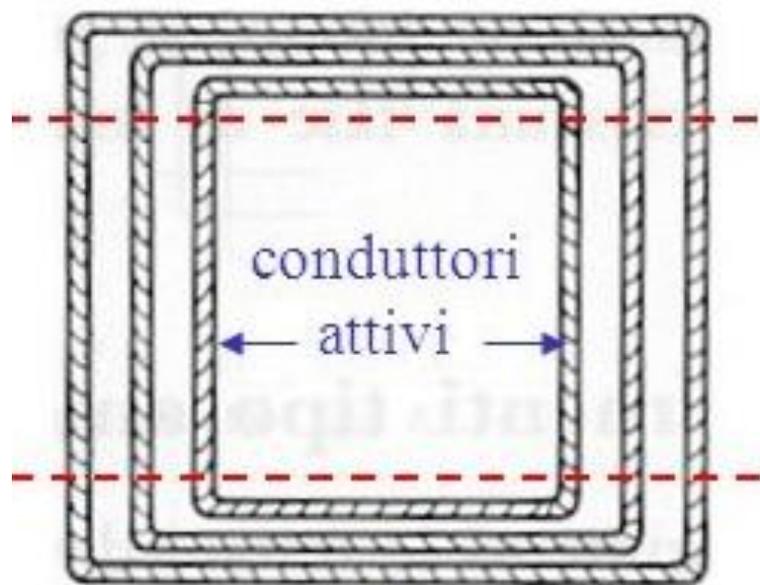
La fase B deve essere distante 120 gradi elettrici dalla fase A, cioè deve essere sfasata rispetto ad A di $2/3$ del passo polare τ . Analogamente, la fase C deve essere sfasata rispetto ad A di $4/3$ di un passo polare.

In base a questa considerazione, vengono collocati i lati attivi della fasi B e C con i relativi versi convenzionali della corrente.



Nell'avvolgimento trifase a singolo strato questo è l'unico modo di disporre i lati attivi nelle cave, non essendoci possibilità di raccorciamento di passo.

Le differenze stanno nel modo in cui i lati attivi sono collegati tra di loro in testata. Tali collegamenti in testata, tuttavia, non alterano il comportamento della macchina. Infatti, il campo magnetico prodotto dalle correnti di statore al traferro (campo di reazione d'armatura) dipende solo dai lati attivi.

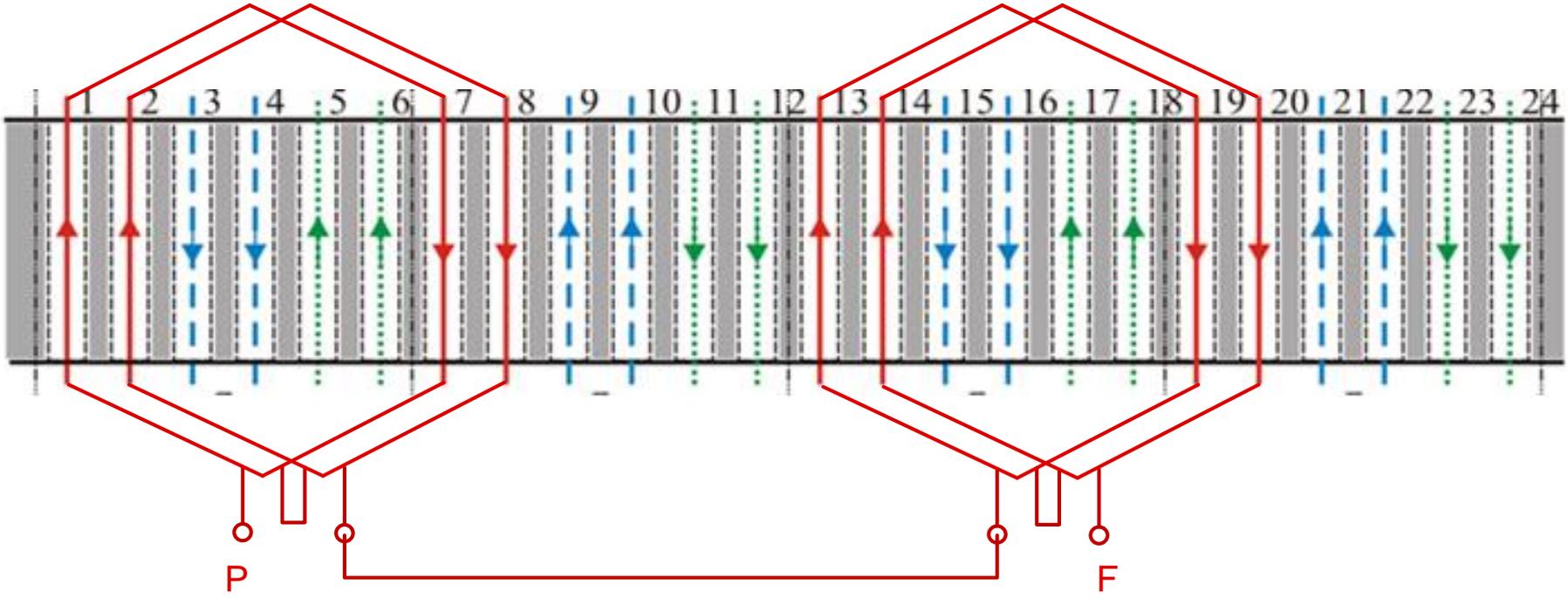


Teste di avvolgimento concentrico.

In un istante di tempo successivo, la corrente nelle fasi sarà cambiata e questo farà sì che lo stesso campo di f.m.m. avanzi in una direzione che dipende dal senso ciclico delle fasi. In ogni caso, se la frequenza di alimentazione è f e la macchina ha p coppie polari, il campo di f.m.m. al traferro ruota con velocità angolare pari a $\omega/p=2\pi f/p$ (ciò verrà mostrato formalmente più avanti).

Per poter produrre praticamente il campo rotante al traferro (su cui si basa il funzionamento della macchina), i conduttori attivi, disposti come visto, devono essere collegati tra loro mediante connessioni in testata in modo da consentire alla corrente di fluire attraverso le tre fasi. **Definire il modo in cui i lati attivi sono distribuiti nelle cave e il modo in cui essi sono collegati in testata per formare le tre fasi di macchina significa determinare lo schema di avvolgimento.**

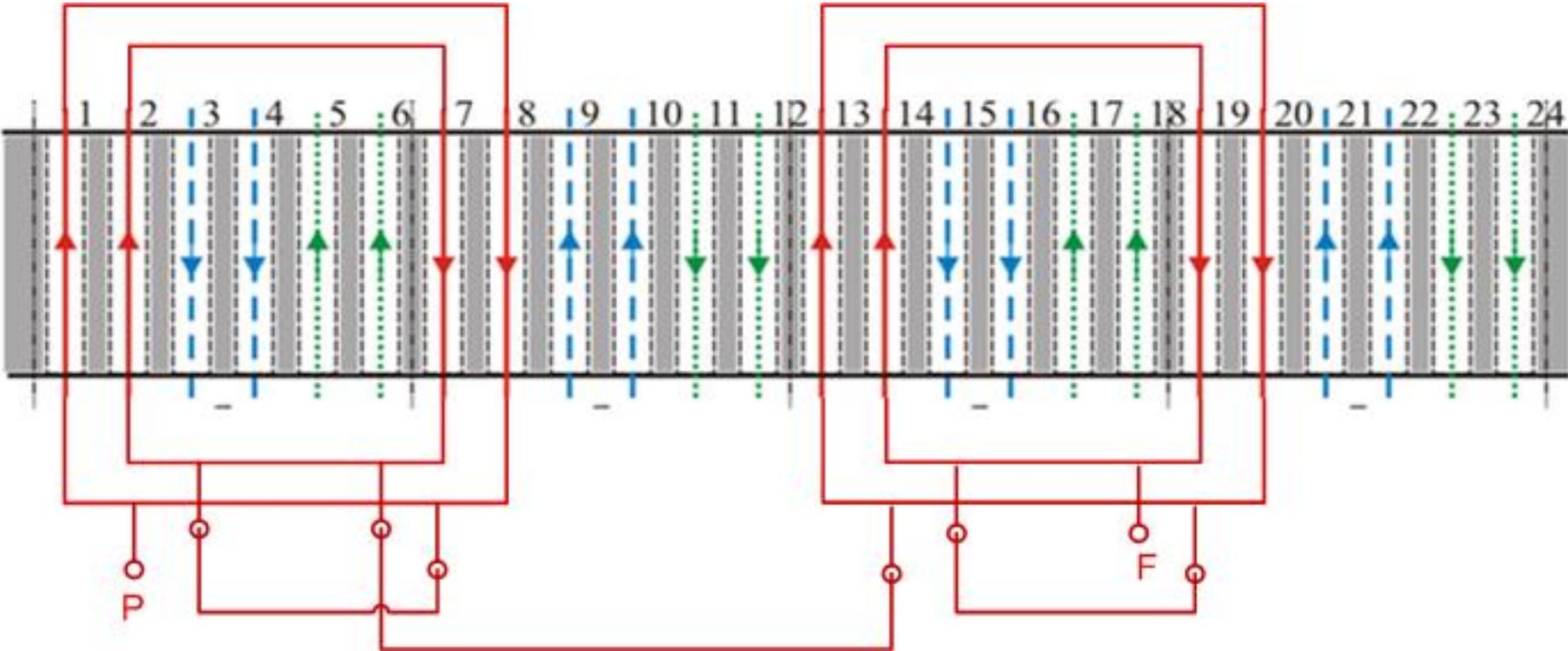
Un possibile modo di collegare i lati attivi è usare bobine embricate tutte uguali, ciascuna avente passo di bobina pari al passo polare. Ogni bobina comprende una coppia di lati attivi che distano un passo polare.



Embricato, a spirale, progressivo, a spira lunga

Il problema sta negli incroci delle testate. Infatti, le due testate di ogni singola bobina non possono essere a due "altezze" diverse come nel doppio strato e tenderebbero ad accavallarsi.

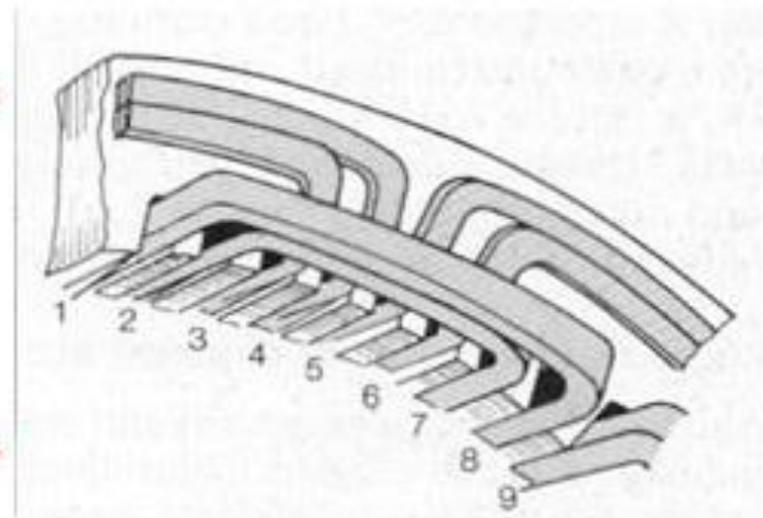
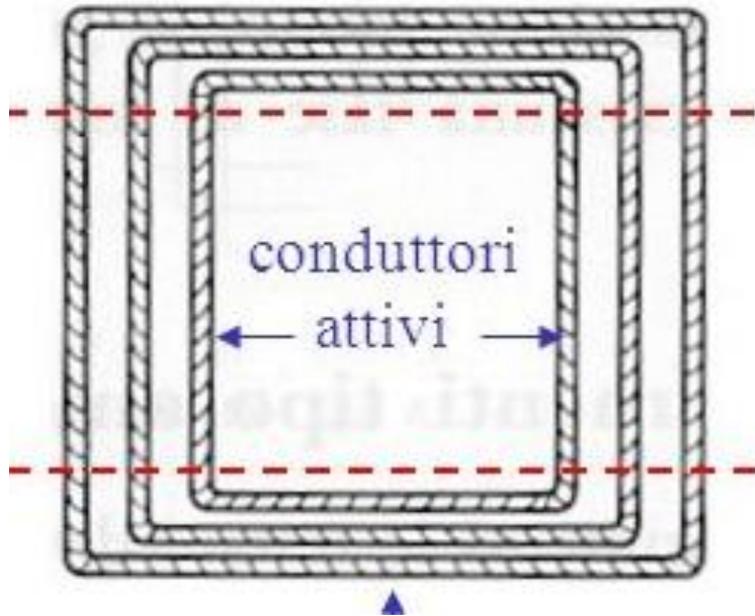
Una soluzione è quella di usare bobine concentriche, cioè bobine di forma diversa tali che le testate non si sovrappongano.



Concentrico, a spirale, progressivo, a spira lunga

L'uso di bobine diverse costituisce ovviamente una complicazione costruttiva.

Testate in più «ordini»



Teste di avvolgimento concentrico.

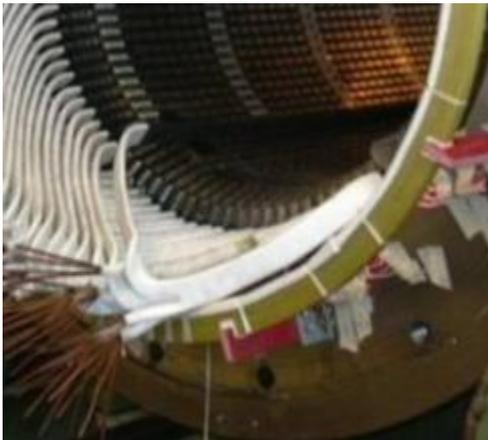
2.2 AVVOLGIMENTO A DOPPIO STRATO

E' di gran lunga la tipologia di avvolgimento più usata, sia per macchine piccole che per per macchine grandi.

E' caratterizzato dal fatto che nella stessa cava ci sono due lati attivi.

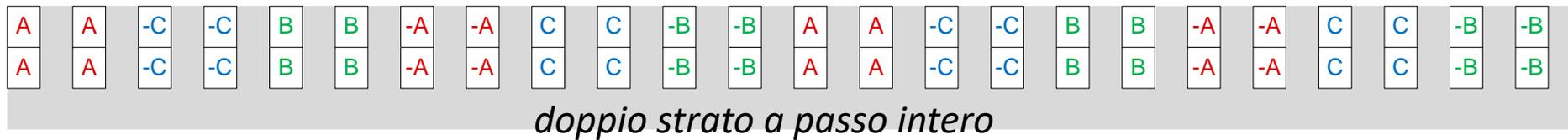
I vantaggi del doppio strato sono:

- semplice realizzazione delle testate
- possibilità di usare bobine uguali
- possibilità di effettuare il raccorciamento di passo

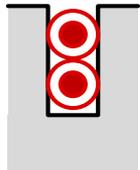
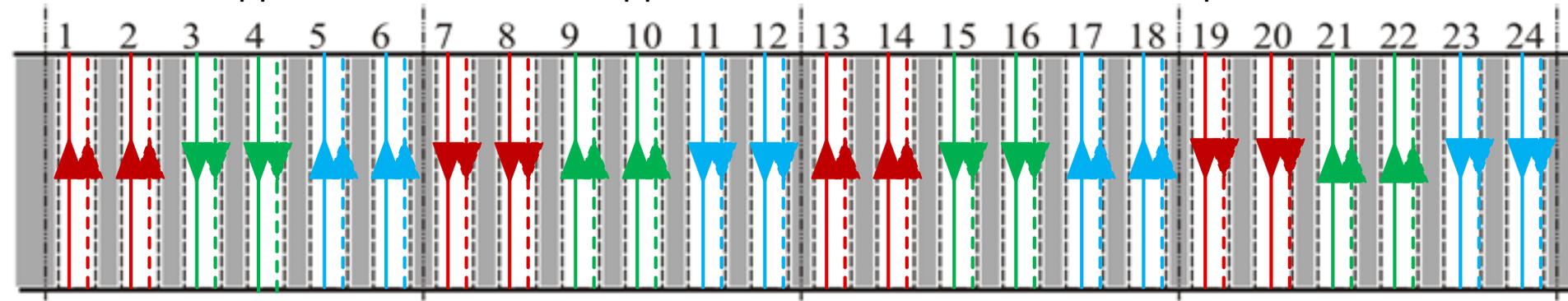


2.2.1. AVVOLGIMENTI A DOPPIO STRATO A PASSO INTERO

La soluzione più semplice è quella di replicare, nei due strati, la stessa distribuzione di lati attivi vista per il singolo strato. **In questo modo si ottiene un avvolgimento a doppio strato a passo intero, che si comporta esattamente come un avvolgimento a singolo strato** (stesso campo di f.m.m. al traferro), ma è di costruzione più semplice (bobine uguali, no incroci testate).



Nel caso di doppio strato si usa una rappresentazione convenzionale del tipo mostrato sotto:



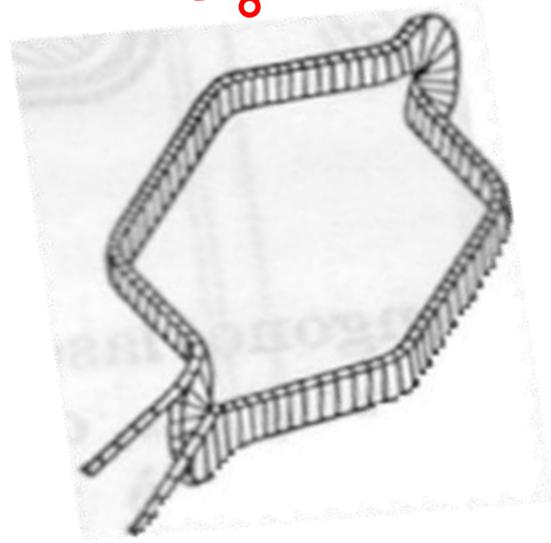
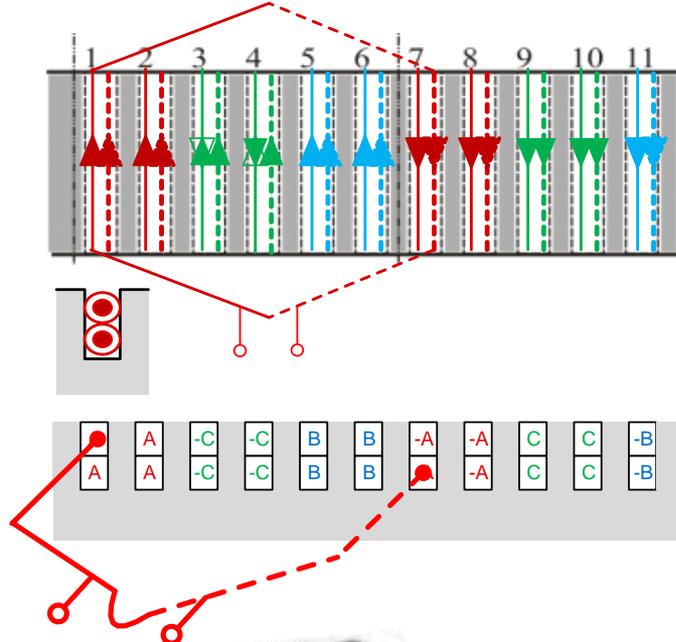
In ogni cava sono indicati i due conduttori attivi, dei quali quello lato traferro è indicato con linea continua, quello lato fondocava con linea tratteggiata.

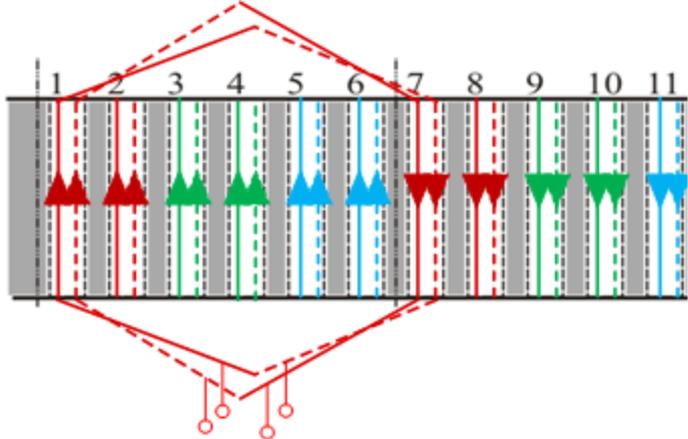
L'avvolgimento a doppio strato può essere realizzato: con bobine multispira (statore) o con barre (rotore avvolto). Cominciamo con l'avvolgimento a bobine multispira (statore asincroni).

2.2.1.1 AVVOLGIMENTI A DOPPIO STRATO A PASSO INTERO CON BOBINE MULTISPIRA

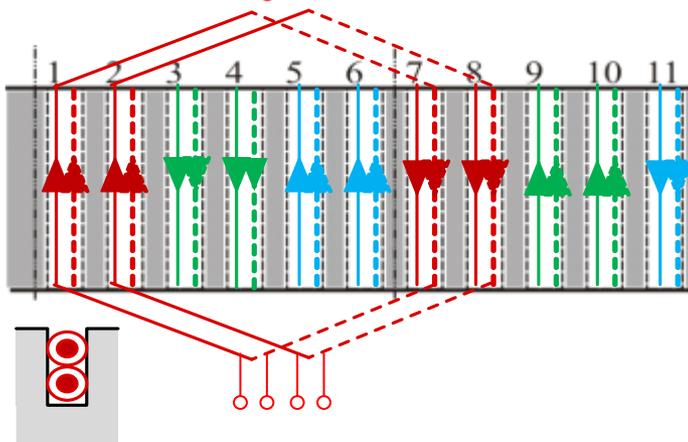
Nel caso di passo intero, ogni bobina comprende due lati attivi distanti un passo polare, di cui uno nello strato superiore, uno nello strato inferiore.

Nel nostro caso la bobina comprende il lato attivo superiore della cava 1 e quello inferiore della cava 7.



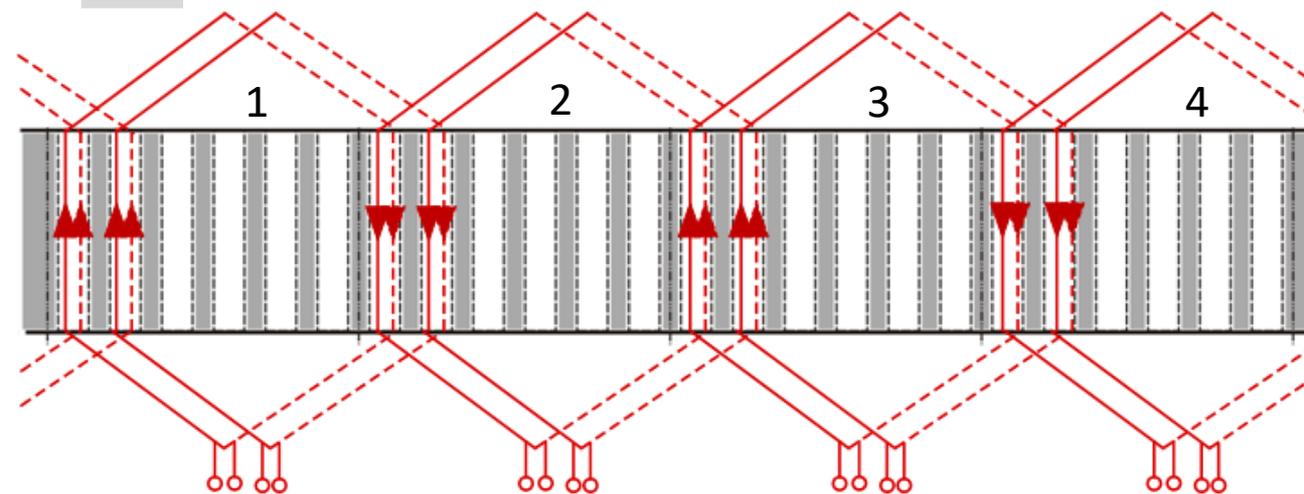


Come continuare nella realizzazione dell'avvolgimento?
 Supponendo i due lati attivi presenti nelle cave 1 e 7 non possono essere connessi mediante un'altra bobina. Infatti, in questo modo, si creerebbe una sovrapposizione delle testate.



Al contrario, è possibile prevedere una ulteriore bobina che comprende i lati attivi posti nella cava 2 e nella cava 8 senza creare sovrapposizioni.

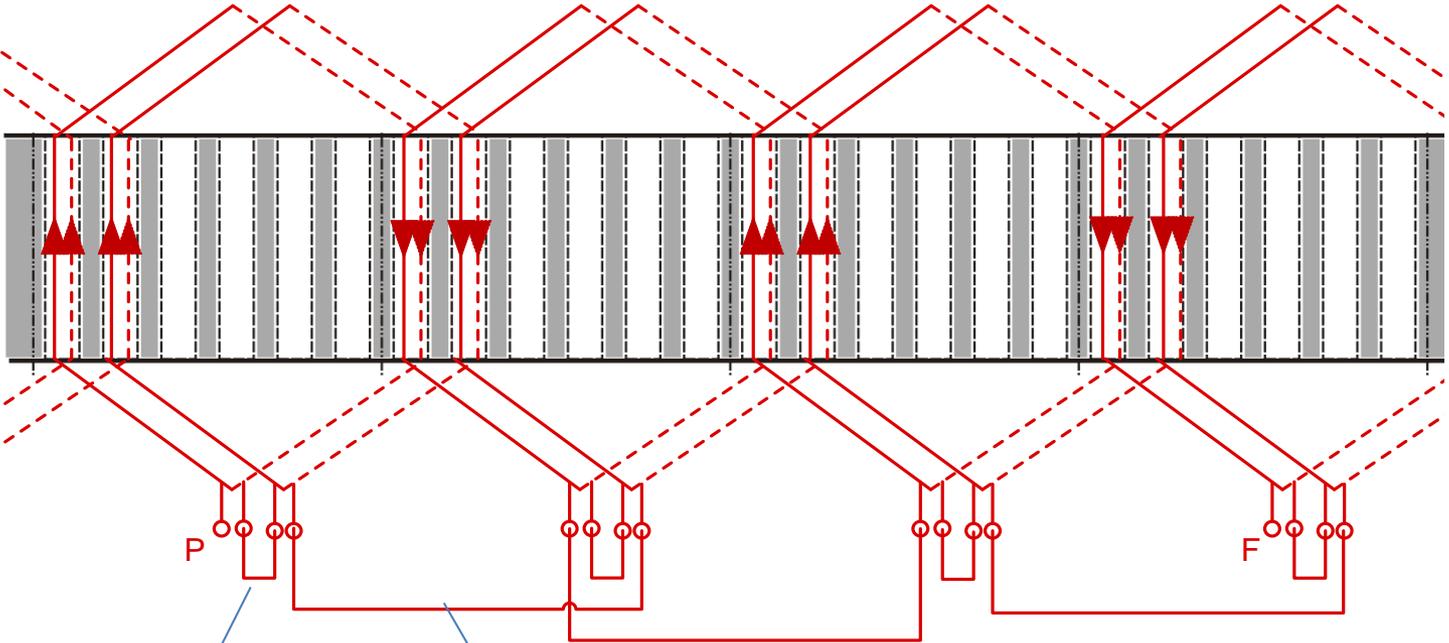
Lo stesso può essere fatto con gli altri poli.



Le bobine della fase A sono quindi disposte come in figura senza creare accavallamento delle testate.

Ci sono 4 gruppi di bobine, indicati con i numeri da 1 a 4.

A questo punto si tratta di collegare le bobine di una fase tra di loro. In generale, ogni fase, può contenere più rami in parallelo, quindi le connessioni tra le bobine possono essere sia connessioni serie sia parallelo. Per ora supponiamo di non avere rami in parallelo, cioè supponiamo che tutte le bobine della fase siano connesse in serie. Si possono allora avere diversi schemi di collegamento:



COLLEGAMENTO
DI TIPO
REGRESSIVO

Collegamento
corto

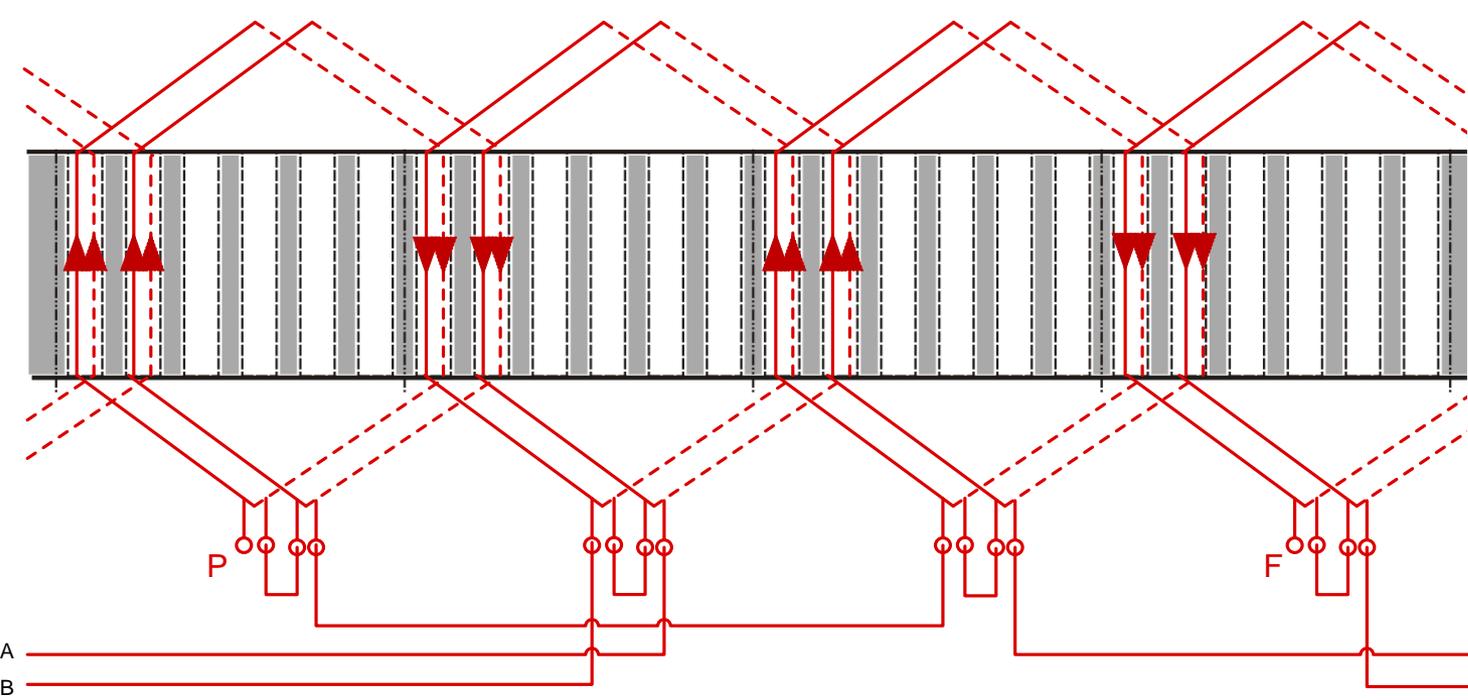
Collegamento
lungo

I collegamenti in serie tra bobine dello stesso gruppo sono detti **collegamenti corti**, quelli tra bobine di gruppi diversi **collegamenti lunghi**.

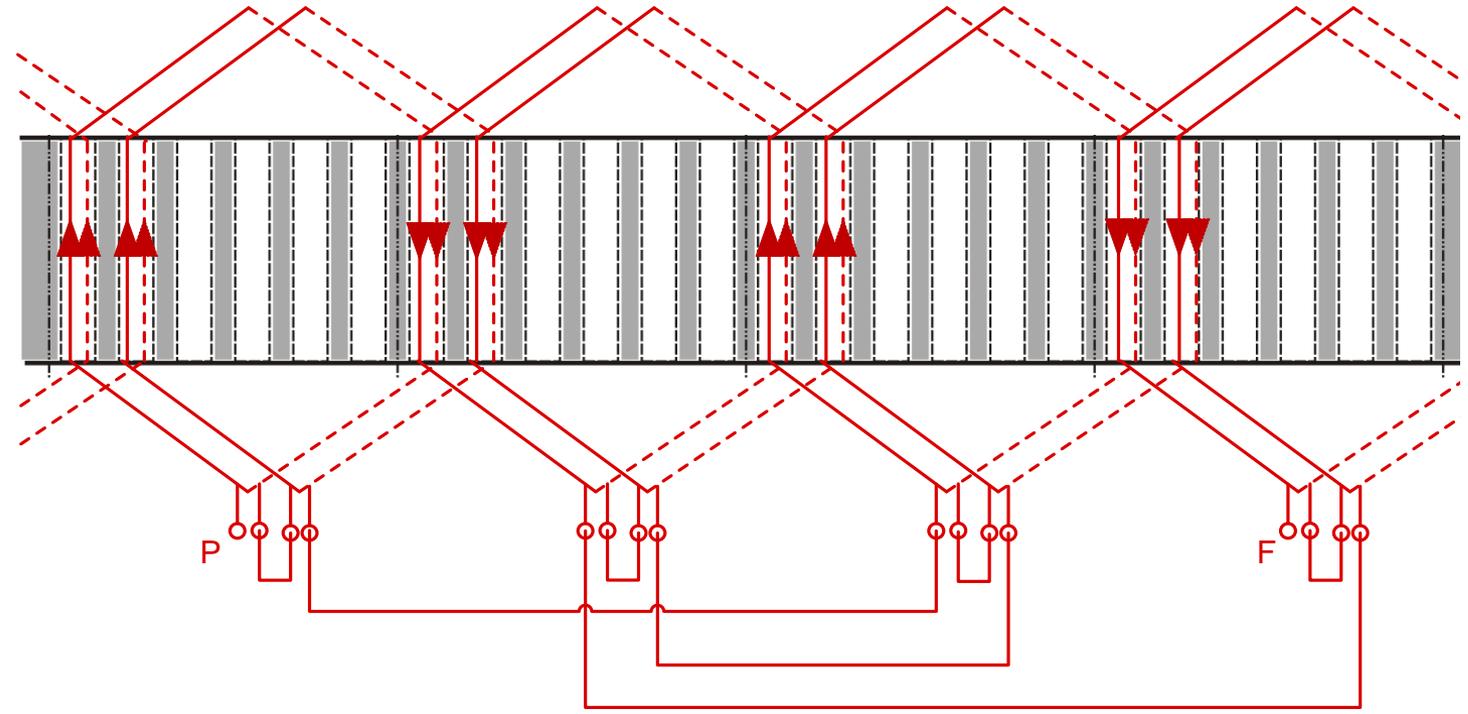


Collegamenti
lunghi

Collegamenti
corti



COLLEGAMENTO DI TIPO PROGRESSIVO-REGRESSIVO (implementazione A)



COLLEGAMENTO DI TIPO PROGRESSIVO-REGRESSIVO (implementazione B)

PARALLELI DI MACCHINA IN AVVOLGIMENTI CON BOBINE MULTISPIRA

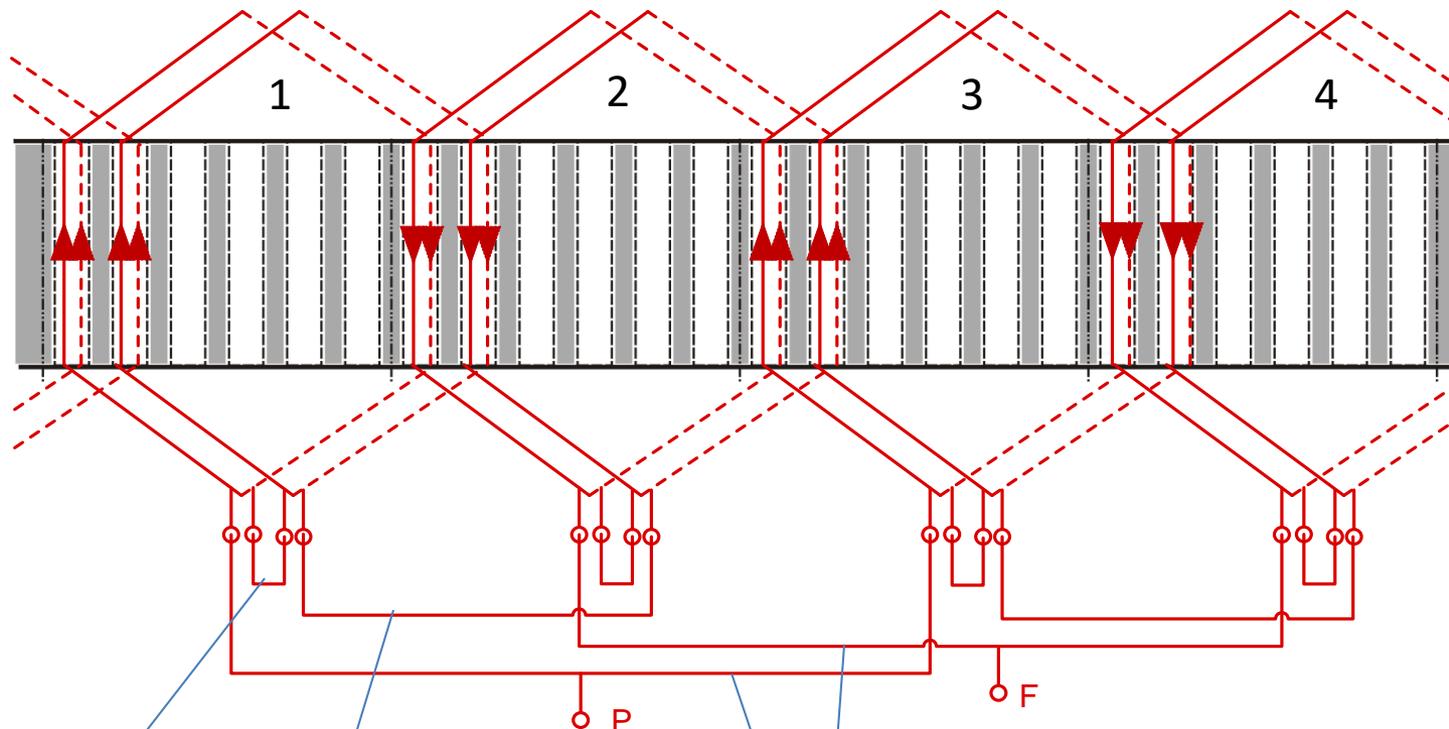
Come detto, ci possono essere in una fase rami in parallelo.

La formazione di rami in parallelo deve rispettare le seguenti regole:

- 1) Possono essere collegati in parallelo solo gruppi di bobine (per polo fase), cioè le bobine di uno stesso gruppo polo-fase sono sempre connesse in serie.
- 2) Come conseguenza di 1), il numero di paralleli di macchina b deve essere un sottomultiplo del numero di poli. Infatti, ogni ramo in parallelo deve contenere un numero intero di gruppi di bobine polo fase, numero pari a P/b , con P numero di poli.
- 3) Nell'ipotesi di flusso sinusoidale al traferro, nei rami in parallelo devono originarsi in ogni istante forze elettromotrici identiche.

NOTA: conseguenza di 1) è che i collegamenti di parallelo sono sempre collegamenti lunghi, cioè tali da connettere bobine di gruppi diversi.

Ad esempio, in una macchina a 4 poli, ci possono essere 2 o 4 rami in parallelo. Vediamo il caso di 2 rami in parallelo. Ci sono diversi modi per realizzare l'avvolgimento, a seconda di quali coppie di gruppi di bobine si connettono in parallelo. Una soluzione è mettere in parallelo le coppie di gruppi 1-2 e 3-4:



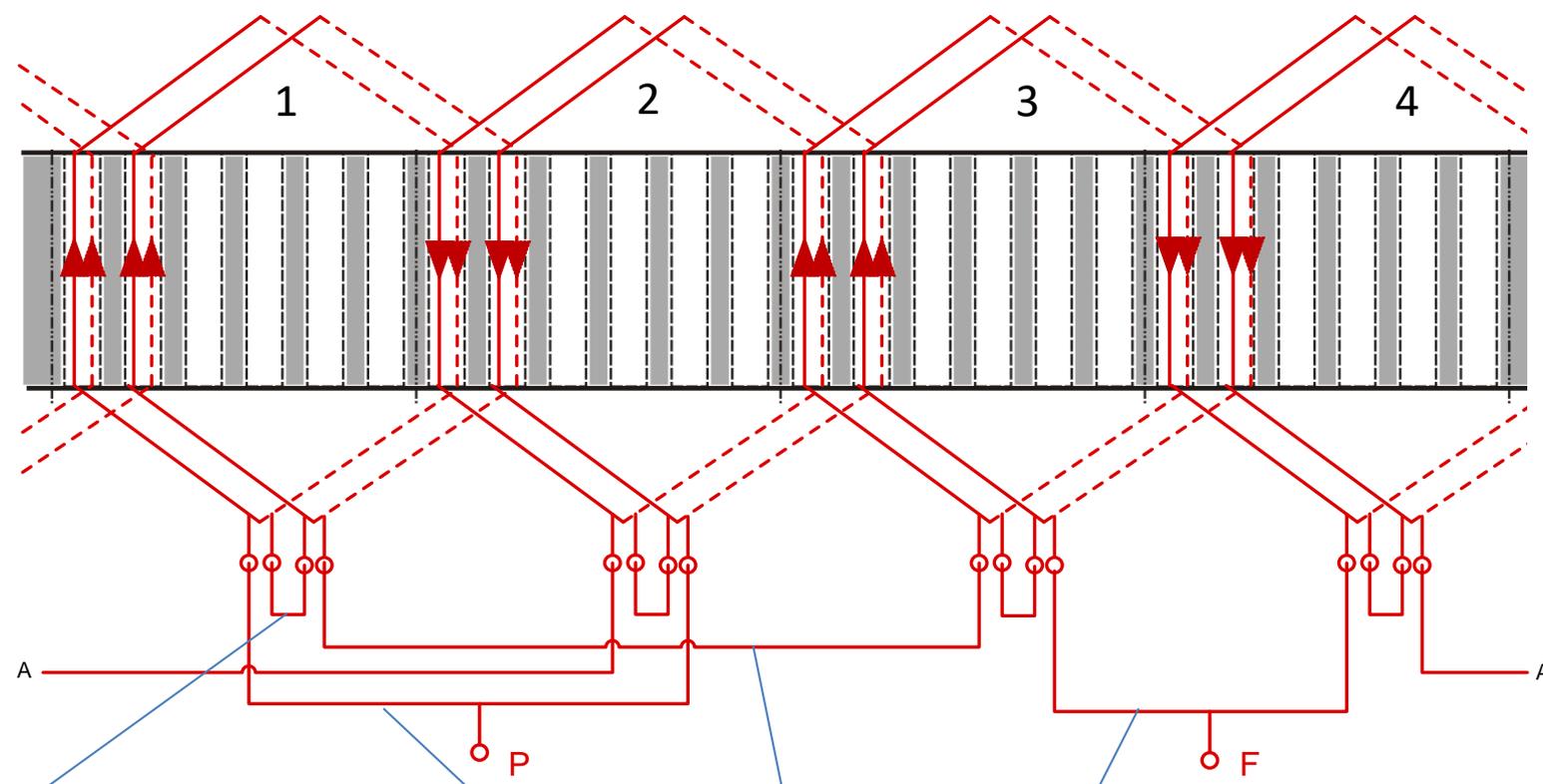
Collegamento serie lungo

Collegamento serie corto

Collegamenti di parallelo

In questo caso i gruppi 1 e 2 sono connessi in serie così come i gruppi 3 e 4. Viene quindi fatto il parallelo tra i gruppi (1+2) e (3+4).

Ci sono naturalmente altre possibilità. Ad esempio, partendo dallo schema regressivo, si ha:



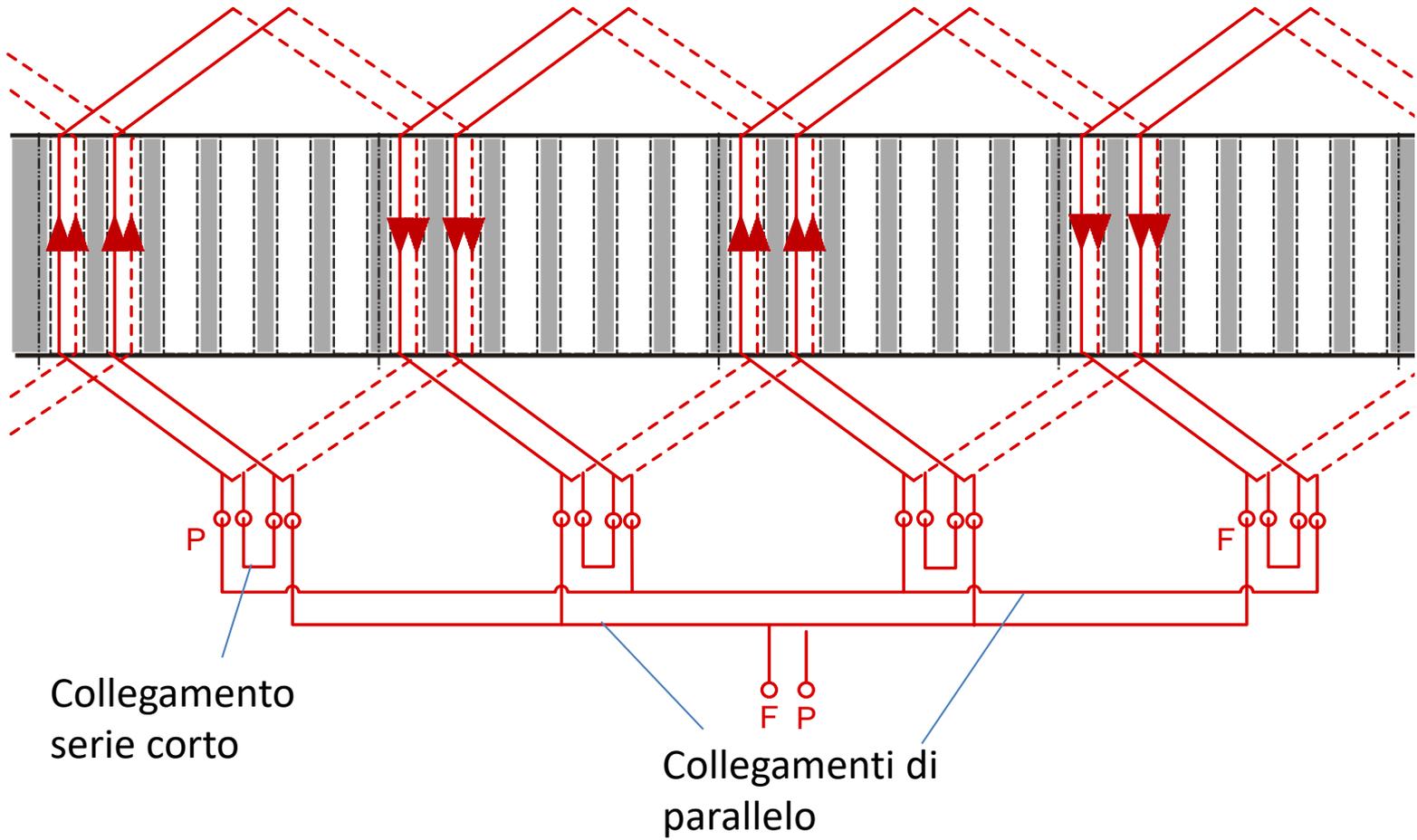
Collegamento serie corto

Collegamento serie lungo

Collegamenti di parallelo

I gruppi 1 e 3 sono connessi in serie, come i gruppi 2 e 4. Vengono quindi messi in parallelo i gruppi (1+3) e (2+4).

Nel caso di macchina a 4 poli, ci possono essere anche 4 paralleli. In questo caso tutti i 4 gruppi di bobine sono connessi tra loro in parallelo.

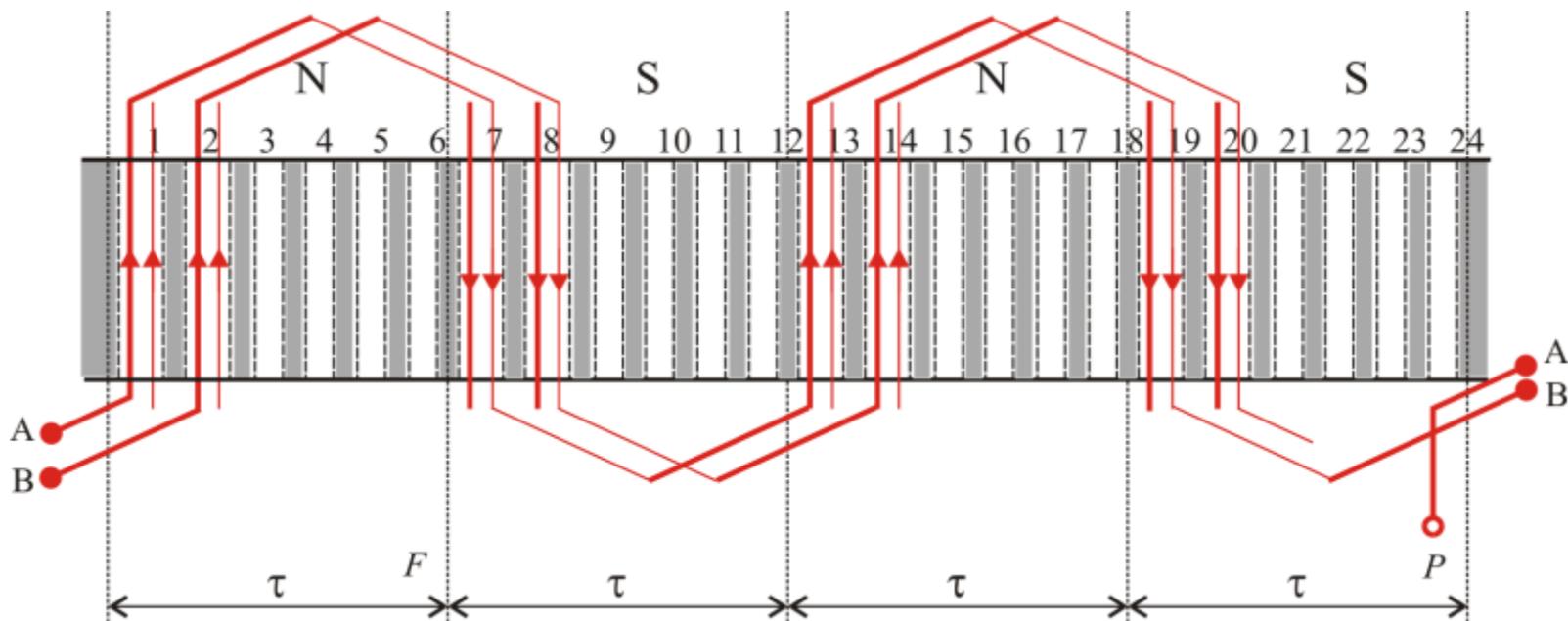


In questo caso non ci sono collegamenti serie lunghi.

2.2.1.1 AVVOLGIMENTI ONDULATI A BARRE (ROTORE AVVOLTO)

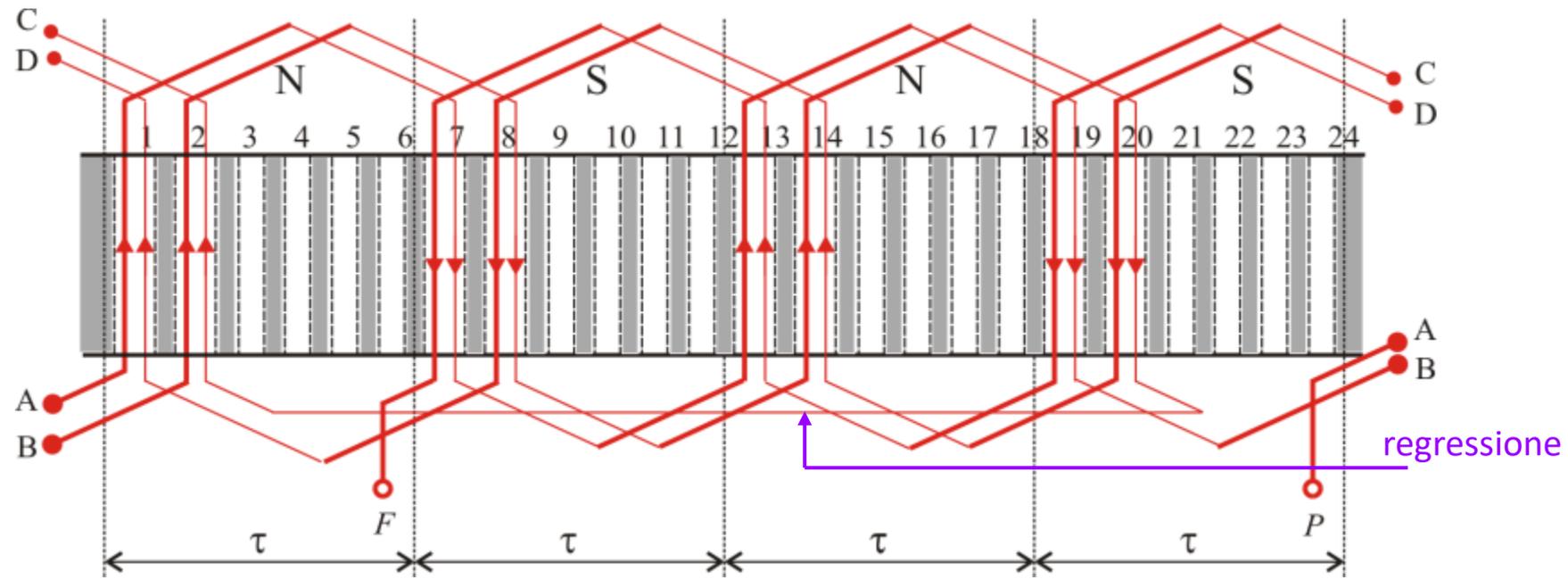
Dal punto di vista concettuale, l'avvolgimento ondulado si costruisce collegando in testata conduttori alternativamente dello strato superiore e dello strato inferiore, tra loro distanti un passo polare, procedendo sempre nella stessa direzione (come nel caso di singolo strato).

In questo modo si costruisce la metà avvolgimento mostrata sotto.



A questo punto serve “tornare in dietro” prevedendo una regressione (a differenza di quanto visto nel singolo strato).

Dopo la regressione si continua come prima per collegare i rimanenti lati attivi ma procedendo in senso opposto.

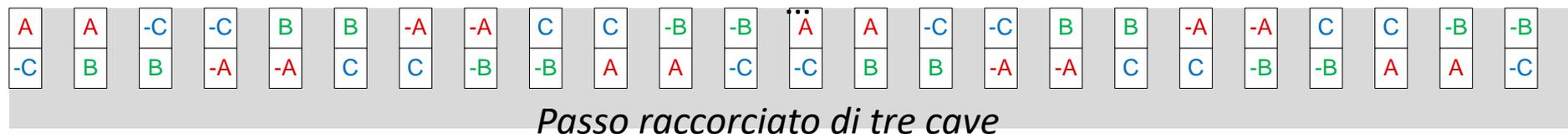
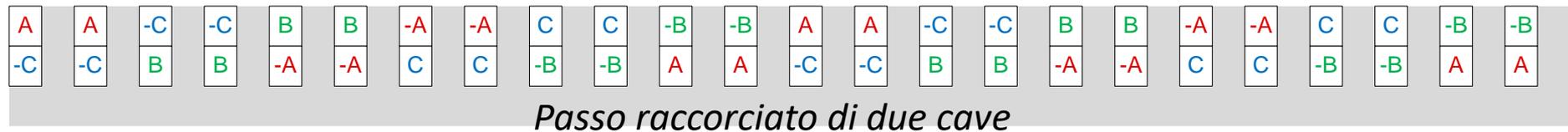
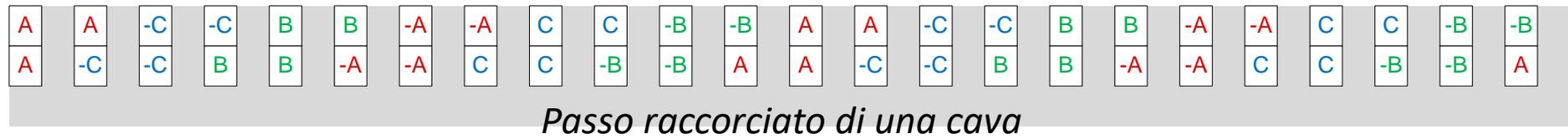
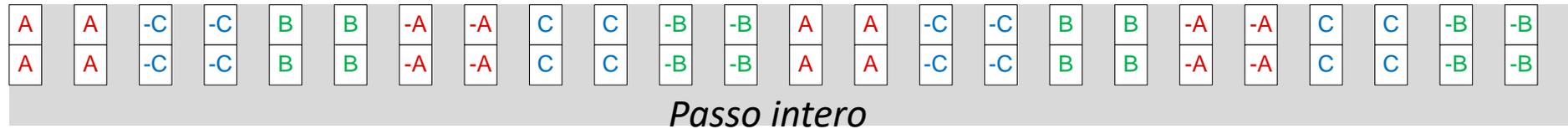


PARALLELI DI MACCHINA IN AVVOLGIMENTO ONDULATO

Anche nel caso degli avvolgimenti ondulati, è possibile realizzare rami in parallelo, in un numero b tale che P/b dia un numero intero. In una macchina con Z cave, quindi con $2Z$ lati attivi ($2Z/3$ lati attivi per fase), si procede come per l'avvolgimento tutto serie (sopra) collegando i primi $2Z/(3b)$ lati attivi e si ottiene così il primo ramo in parallelo. Proseguendo con i successivi $2Z/(3b)$ lati attivi si ottiene il secondo ramo in parallelo, e così via.

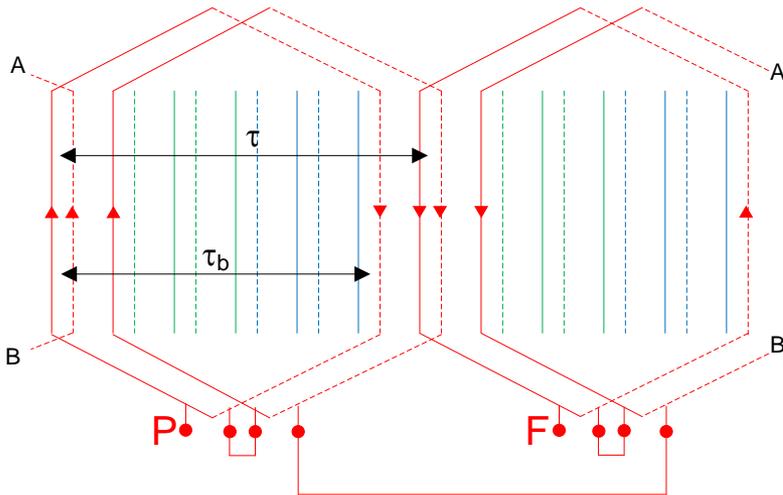
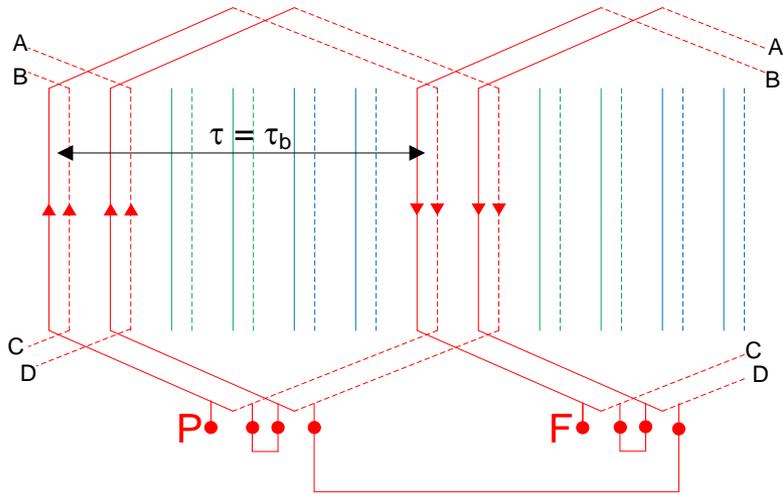
2.2.4. AVVOLGIMENTI A DOPPIO STRATO A PASSO RACCORCIATO

Un avvolgimento a passo raccorciato di n cave con p coppie polari e q cave per polo/fase si ottiene dall'avvolgimento a passo intero con pari caratteristiche semplicemente traslando lo strato inferiore appunto di n cave e lasciando esattamente invariati i collegamenti in testata tra lati attivi.



Quinti tutto quanto detto fin qui per un avvolgimento a passo intero si applica ad un avvolgimento a passo raccorciato di n cave, salvo traslare lo strato inferiore (cioè i lati attivi inferiori) di n cave.

Esempio (P=2, q=2)



I lati attivi dello strato inferiore (tratteggiati) sono traslati verso sinistra di una cava. I collegamenti in testata sono mantenuti invariati.

In particolare, negli avvolgimenti a bobine multispira (statore) a passo raccorciato, il passo di bobina τ_b risulta minore del passo polare τ .

Il principale vantaggio del raccorciamento di passo consiste nel miglioramento del contenuto armonico della f.m.m. prodotta dallo statore al traferro e della f.e.m. indotta nelle fasi.