

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E  
DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"-DEI*

*SEDE DI CESENA*

*CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA PER  
L'ENERGIA E L'INFORMAZIONE*

**TESI DI LAUREA**

in

**Conversione elettromeccanica dell'energia**

**ADDITIVE MANUFACTURING: tecnologia innovativa per  
l'ottimizzazione di macchine elettriche**

CANDIDATO:

Alberto Prati

RELATORE:

Prof. Alberto Bellini

CORRELATORE:

Prof.ssa Elena Macrelli

Anno Accademico 2021/2022

Sessione II

# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>1. STATO DELL'ARTE DELL'AM .....</b>	<b>7</b>
<b>2. TECNICHE DI STAMPA 3D .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Stampe 3D a polvere.....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Powder Bed Fusion (PBF) .....	10
2.1.2 Binder Jet Printing (BJP) .....	13
2.1.3 Direct Energy Deposition (DED).....	15
<b>2.2 Stampa 3D a liquido .....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Stereolithography (SLA).....	17
2.2.2 Digital Light Processing (DLP) .....	19
<b>2.3 Stampa 3D a solido .....</b>	<b>20</b>
<b>3. AM PER COMPONENTI DI MACCHINE ELETTRICHE .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Nucleo .....</b>	<b>23</b>
3.1.1 Soft Magnetic Materials.....	25
3.1.1.1 Ferro-Cobalto (FeCo).....	26
3.1.1.2 Ferro-Nickel (FeNi) .....	26
3.1.1.3 Ferro-Silicio (FeSi) .....	27
3.1.1.4 Confronto tra SMMs.....	28
3.1.2 Grain-Oriented Electrical Steel.....	30
3.1.3 Topology Optimization .....	31
<b>3.2 Avvolgimenti e bobine .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 Magneti permanenti .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Parti passive .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5 AM nel design di monitoraggio termico .....</b>	<b>44</b>
3.5.1 AM Heat Sink .....	45
3.5.2 AM Heat Exchangers .....	47
3.5.3 AM Heat Pipe.....	50
3.5.4 AM Indirect Liquid Jacket.....	52
3.5.5 AM Direct Liquid Cooling Winding.....	53
<b>4. PRODUZIONE DI UNA MACCHINA ELETTRICA COMPLETA.....</b>	<b>55</b>
4.1 Switched Reluctance Machine (SRM) .....	57
4.2 Synchronous Reluctance Machine (SynRM).....	57

4.3 Claw-Pole Machine (CPM) .....	59
4.4 Hysteresis Motor .....	60
<b>5. ESEMPIO DI APPLICAZIONE: SETTORE AUTOMOTIVE.....</b>	<b>61</b>
5.1 IPM motor .....	62
5.2 SynRM motor.....	64
5.3 Confronto tra IPM e SynRM.....	67
<b>6. CONCLUSIONI.....</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>70</b>
<b>SITOGRAFIA.....</b>	<b>79</b>

## INTRODUZIONE

La popolazione umana è cresciuta in modo esponenziale durante il secolo scorso e secondo le previsioni si dovrebbe arrivare ad un ennesimo incremento che ci porterà a raggiungere i nove o dieci miliardi di esseri umani entro il 2050<sup>1</sup>. Tutto ciò è accompagnato da un conseguente aumento del consumo di risorse naturali, determinato dal progresso tecnologico. Questo progresso ha portato, al giorno d'oggi, a nuove tecnologie sempre più performanti, richiedendo però un uso in maggiori quantità di risorse, dotate di proprietà molto vantaggiose che si prestano bene a utilizzi sempre più specifici. Tra le più importanti troviamo quelle appartenenti alle terre rare.

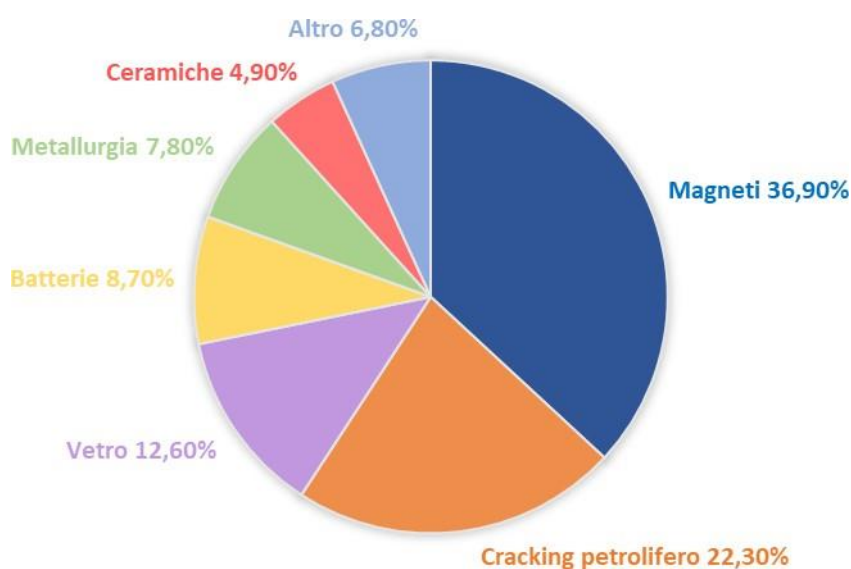
Secondo la definizione della IUPAC, le terre rare, dette REE (Rare Earth Elements), sono un gruppo di 17 elementi chimici della tavola periodica, più precisamente Scandio, Ittrio e i 15 Lantanoidi cioè Lantanio, Cerio, Praseodimio, Neodimio, Promezio, Samario, Europio, Gadolinio, Terbio, Disprosio, Osmio, Erblio, Tulio, Itterbio e Lutezio (Figura 1).



*Figura 1 Elementi chimici facenti parte delle Terre rare.*

<sup>1</sup> <https://ourworldindata.org/world-population-growth#:~:text=Two%20hundred%20years%20ago%20the,to%207.7%20billion%20in%202019>

Le proprietà degli elementi delle terre rare, soprattutto dal punto di vista chimico, ne hanno permesso un largo utilizzo in svariati campi. Secondo il portale Statista<sup>2</sup> e il governo Canadese, le terre rare a livello industriale vengono usate principalmente in questi settori (figura 2).



*Figura 2 Rappresentazione dei principali settori che utilizzano gli elementi delle terre rare.*

Il termine “terre rare”, a prima vista, potrebbe suggerire una disponibilità limitata, in realtà sono relativamente abbondanti sulla crosta terrestre; ciò nonostante, i bassi livelli di concentrazione dei singoli elementi presenti nei minerali portano le attività di estrazione e separazione a risultare molto complesse, costose e impattanti sull’ambiente circostante.

Le terre rare non si trovano mai in natura in forma nativa cioè “pura” come accade invece per elementi quali per esempio oro, argento o il rame, ma sono situate sempre all’interno di altri minerali dove è estremamente difficile estrarre i singoli componenti. Il processo di estrazione di terre rare inizia con una fase di dissoluzione, nella quale grazie all’utilizzo di acidi si riesce a estrarre le terre rare dalle rocce; in seguito, avviene una separazione tra i differenti REE grazie all’utilizzo di sostanze chimiche come il solfato di ammonio e il cloruro di ammonio per ottenere soluzioni concentrate e infine, si ottiene il prodotto finale. L’insostenibilità ambientale del processo di estrazione delle terre rare risulta un problema di dimensioni enormi.

---

<sup>2</sup> <https://www.statista.com>

L'estrazione di materia comporta infatti un elevato degrado ambientale, nonché rischi per la salute e contaminazione del suolo e delle acque. Per queste ragioni e considerando l'aumento della popolazione e la crescita della domanda sarà necessario l'uso di soluzioni adatte e sostenibili. Un esempio lampante di questo degrado ambientale è rappresentato dalla Cina dove, viste le "morbide" regole attuate da parte del governo cinese riguardo l'impatto ambientale, si è arrivati alla situazione disastrosa descritta.

Attualmente il commercio e la produzione mondiale delle terre rare hanno portato a conseguenze importantissime a livello geopolitico. In particolare, si sta venendo a creare sempre più una competizione mondiale dove si vede su tutti privilegiare la Cina con oltre il 95% delle terre rare estratte nel mondo<sup>3</sup> questo grazie anche alla chiusura di miniere da parte degli altri paesi, visti i prezzi cinesi più convenienti. Infatti, a causa dell'impatto ambientale e delle regolamentazioni dei vari paesi, si delegò l'estrazione e la produzione di terre rare al fine di ottenere i prodotti finiti necessari per il proprio mercato, senza danneggiare il territorio. Questa posizione di quasi totale monopolio ha portato la Cina a investire sulle proprie industrie elettroniche fornendo abbondantemente questo tipo di risorse a discapito dei Paesi esteri verso i quali sono stati imposte delle restrizioni di esportazioni.

Queste limitazioni risultano molto critiche soprattutto per l'Unione Europea, la quale mostra una dipendenza molto forte dalla Cina per le terre rare e altre materie prime. La strategia che vuole essere messa in atto punta ad un'emancipazione dalla Cina; queste iniziative risultano evidenti, in particolare, con l'Erma<sup>4</sup>-Associazione europea per le materie prime-che punta su progetti sul suolo europeo che possano essere operativi entro il 2025.

Tutte queste problematiche elencate precedentemente riguardo le terre rare, stanno portando ai giorni d'oggi sempre più industrie ad investire su nuove soluzioni senza l'utilizzo delle REE. Una di queste è rappresentata dall'Additive Manufacturing (AM). Questa tecnologia permette la progettazione e la costruzione di macchine elettriche attraverso diverse tecniche che verranno approfondite in questa tesi. Il capitolo 1 tratterà lo stato dell'arte dell'AM descrivendone lo stato attuale di sviluppo e ricerca con possibilità di applicazione in vari settori; il capitolo 2 presenterà le varie tecniche di stampa 3D mostrando di ognuna le potenzialità; il capitolo 3 verterà sull'applicazioni delle tecniche AM per l'ottimizzazione dei componenti di una

---

<sup>3</sup> [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/rare-earth-elements-permanent-magnets-and-motors\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/rare-earth-elements-permanent-magnets-and-motors_en)

<sup>4</sup> <https://erma.eu>

macchina elettrica; il capitolo 4 esporrà la realizzazioni di macchine elettriche complete attraverso le tecniche AM. Al termine della trattazione, prendendo come riferimento il settore dell'Automotive, verrà eseguito un confronto tra un motore a magneti permanenti detto IPM, attualmente uno dei più usati per la trazione elettrica, che si basa sull'utilizzo delle REE e una macchina a riluttanza sincrona costruita usando le tecniche dell'Additive Manufacturing, andando ad analizzare, attraverso dei parametri prestazionali, le caratteristiche di ognuno.

# 1. STATO DELL'ARTE DELL'AM

Lo sviluppo tecnologico sta portando sempre più verso una richiesta di straordinari parametri prestazionali riguardo l'applicazione delle macchine moderne. In aggiunta a ciò, richieste sempre più complesse da parte dei progettisti hanno portato ad approcciarsi con più insistenza verso la rivoluzione dell'Additive Manufacturing.

L'Additive Manufacturing (AM) è una tecnologia produttiva innovativa facente parte dell'Industry 4.0 considerata la quarta rivoluzione industriale.

La Stampa3D, altro nome che viene utilizzato per indicare l'Additive Manufacturing, sta riscuotendo sempre più interesse andandosi a collocare come un vero e proprio processo di produzione alternativo, potendo offrire di enormi potenzialità per molte applicazioni industriali più o meno specifiche. Rispetto agli altri processi di produzione tradizionali, l'AM garantisce differenti vantaggi come, ad esempio, la realizzazione di strutture geometriche complesse, la possibilità di usare un'ampia gamma di multimateriali e una prototipazione rapida<sup>5</sup>.

Per la realizzazione di geometrie complesse, si parte sempre da un disegno CAD 3D dell'oggetto da produrre che viene successivamente convertito in un formato adeguato alla lavorazione, generalmente viene usato STL (Standard Triangulation Language). Questo formato risulta utile perché funge da interfaccia tra il modello del CAD 3D e il software dedicato per la produzione del file macchina. Questo software stabilisce l'orientamento dell'oggetto nella sua realizzazione e genera i supporti, che possono essere costruiti in precedenza e permettono all'oggetto di non collassare su sé stesso durante il processo di produzione. Di conseguenza la scelta del materiale per la realizzazione di questi supporti risulta di fondamentale importanza. Il software, inoltre, esegue anche un'operazione di *slicing*, che permette di ottenere diverse sezioni che andranno a formare il modello dell'oggetto. Successivamente a questa operazione, viene generato l'oggetto per strati mettendo uno strato sopra l'altro. Una volta ultimata la realizzazione dell'oggetto, si possono applicare trattamenti di post-produzione al fine di migliorare il prodotto finito. La possibilità per l'Additive Manufacturing di utilizzare componenti multimateriale costituisce un'interessante innovazione di processo. Si possono realizzare così oggetti con parti diverse e con diverse caratteristiche

---

<sup>5</sup> <https://www.unleashedsoftware.com/blog/12-benefits-of-additive-manufacturing-and-5-disadvantages#:~:text=The%20benefits%20of%20additive%20manufacturing%20on%20supply%20chains%20takes%20many,proximity%20to%20the%20end%2Duser>



tutto in un unico pezzo. Ciò permette all'oggetto prodotto di avere maggiori funzionalità con una velocità maggiore e costi di produzione minori.

L'AM si presta molto bene anche al concetto di prototipazione rapida. Infatti, è possibile creare prototipi in tempi molto brevi permettendo ai progettisti di verificare e validare le caratteristiche del prodotto. Inoltre, la prototipazione non necessita di particolari accorgimenti, dato che la vera e propria produzione definitiva verrà eseguita attraverso tecnologie di tipo tradizionale, non provocando un aumento dei costi.

Visti questi aspetti promettenti sopra elencati, la tecnologia AM sta risultando sempre più interessante anche nel campo della produzione di macchine elettriche. Confrontati con i processi di produzione convenzionali, in questo ambito, i processi dell'Additive Manufacturing non sono ancora arrivati ad uno stadio avanzato. Ma, con l'avanzare dello sviluppo in questo campo, si suppone che l'AM diventerà una valida alternativa per i processi di produzione delle macchine elettriche. Questo è dovuto ai grandi vantaggi in termini di flessibilità di design dell'AM, come componenti di monitoraggio termico e integrazione. Questi offrono numerose applicazioni per particolari macchine che trovano mercato in settori come quello Aerospaziale, Biomedicale, Robotica e dell'Automotive, i quali rappresentano i settori trainanti per questa tecnologia. In questi settori, infatti, si è disposti ad investire per ottenere un processo produttivo più efficiente e prodotti dalle prestazioni superiori. Le applicazioni di queste tecnologie sembrano non avere confini: ad esempio vengono frequentemente utilizzate addirittura nel settore dei beni culturali dove si riescono a realizzare restauri altrimenti impensabili<sup>6</sup>.

Ai giorni d'oggi, i lavori di ricerca riguardo l'AM si sono concentrati principalmente sulla fabbricazione di singole parti di varie macchine elettriche, come blocchi di gestione meccanica e termica, avvolgimenti di bobine, magneti permanenti, pacchetti di statore e rotore, etc. Una fabbricazione additiva su larga scala è un'impresa che ancora deve essere compiuta viste le sfide riguardo la lenta velocità di produzione, i difetti interni di costruzione, la capacità di stampa multimateriale limitata e la necessità di fasi di post-produzione per le parti stampate. Nonostante ci si trovi in una fase iniziale di sviluppo, si stanno facendo passi in avanti riguardo un'integrazione dell'Additive Manufacturing per la produzione su larga scala.

---

6

[https://www.unive.it/pag/14024/?tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=10696&cHash=c0a6cc6a5d206751b5c058a9f974d28c](https://www.unive.it/pag/14024/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=10696&cHash=c0a6cc6a5d206751b5c058a9f974d28c)

## **2. TECNICHE DI STAMPA 3D**

Il termine “stampa 3D” rappresenta un processo additivo in grado di realizzare prodotti depositando materiale mediante una testa di stampa, ugelli o altre tecnologie di stampa. Le varie tecnologie di stampa 3D si differenziano tra di loro in base al modo in cui il materiale viene depositato e successivamente solidificato. Possiamo distinguere quindi tre macro-categorie: polvere, liquido e solido. Per le stampe 3D a polvere si ottiene la polimerizzazione mediante l’utilizzo di un fascio laser o di particolari tipi di addensanti; nelle stampe 3D a liquido, avviene la solidificazione di polimeri liquidi fotosensibili con un fascio laser oppure di luce ultravioletta; infine per le stampe 3D a solido la deposizione del termopolimero eseguita strato su strato si ottiene grazie all’estrusione del materiale.

Di conseguenza, le tecnologie appena citate permettono la realizzazione di prototipi, componenti e prodotti di vario genere, impiegando una vasta gamma di materiali diversi come polimeri, materiali compositi, metalli e ceramiche.

### **2.1 Stampe 3D a polvere**

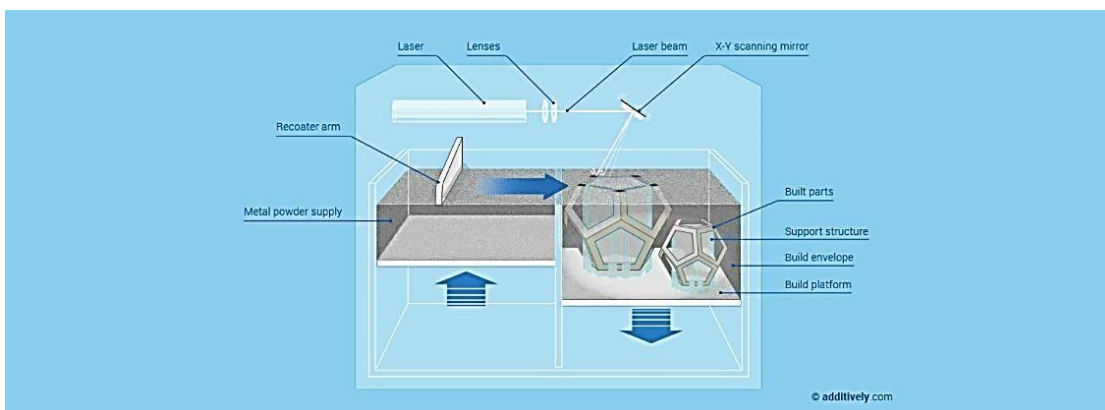
Tra le tecnologie di stampa 3D a polvere ritroviamo:

- Powder Bed Fusion (PBF)
- Binder Jet Printing (BJP)
- Directed Energy Deposition (DED)

Esistono anche altre tecnologie in via di sviluppo e non, ma in questa trattazione verranno affrontate quelle più importanti e utilizzate nei settori industriali.

## 2.1.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Powder Bed Fusion (PBF) rappresenta la tecnologia più diffusa nel mercato per lo stampaggio 3D di metalli. In questo processo, la polvere metallica viene messa nella piattaforma della stampante. Successivamente, un fascio di elettroni o un laser disegna una sezione trasversale sulla superficie dell'area di costruzione per fondere il materiale. Quindi, viene eseguita la fusione del materiale strato dopo strato abbassando di volta in volta la piastra di base partendo dall'oggetto più in basso andando verso l'alto. Inoltre, mentre viene costruito l'oggetto, delle strutture di supporto vengono inserite per dare forza supplementare a speciali sporgenze superficiali. Per ultimo, il pezzo fabbricato viene trattato ancora una volta lucidando le superfici se necessario e rimuovendo le strutture di supporto (Figura 2.1).

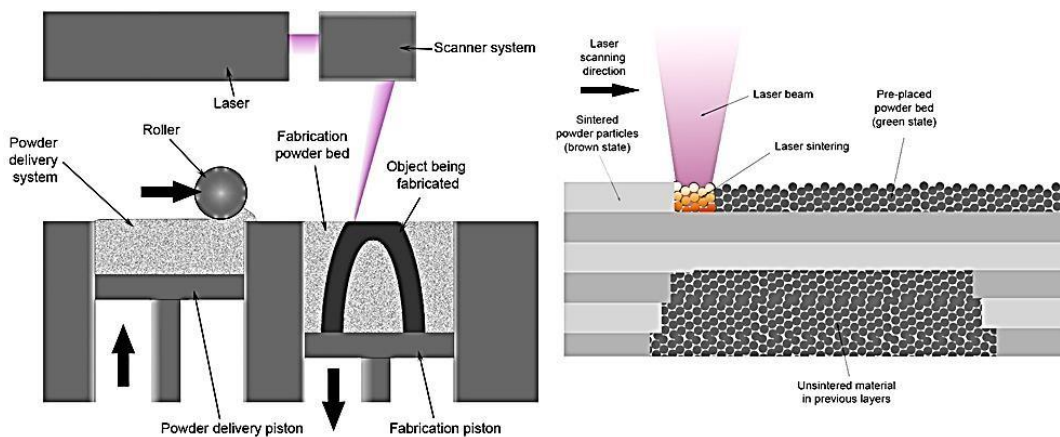


*Figura 2.1 Funzionamento della produzione di metalli mediante PBF.*

In base al tipo di sorgente di energia utilizzata per la fusione del materiale, è possibile ottenere una classificazione della tecnologia PBF: PBF a laser e PBF a fascio di elettroni.

La tecnica più importante delle PBF a laser è Selective Laser Sintering (SLS). Le macchine che sfruttano questa tecnica sono costituite da 3 componenti: una fonte di calore utilizzata per fondere il materiale, un metodo per il controllo di questa fonte di calore e un meccanismo per aggiungere strati di materiale uno dopo l'altro. Ciò che caratterizza il processo SLS è la non necessità di una struttura di supporto aggiuntiva poiché il materiale in polvere funge anche da supporto al modello durante il processo produttivo. La piattaforma di costruzione è situata dentro una camera a temperatura controllata generalmente alcuni gradi inferiore a quella del punto di fusione del materiale, con conseguente riduzione della dipendenza dal laser per fondere gli strati (Figura 2.2).

La tecnica SLS viene sfruttata principalmente a livello industriale con l'utilizzo di polveri di materiali plastici<sup>7</sup>. Si possono trovare anche delle varianti del processo SLS come, ad esempio, Direct Metal Laser Sintering (DMLS) che presenta lo stesso processo di SLS con la differenza dell'utilizzo di polveri metalliche anziché polveri di materiali plastici per la fusione.



*Figura 2.2 Raffigurazione del processo SLS.*

Dal lato opposto, è possibile trovare le tecnologie PBF con un fascio di elettroni come sorgente di energia. In questa categoria ritroviamo Electron Beam Melting (EBM). Per questa tecnologia gli strati sono fusi mediante un raggio di elettroni per fondere le polveri metalliche. L'EBM fornisce modelli con ottime proprietà di resistenza grazie a una distribuzione uniforme della temperatura durante la fusione (Figura 2.3). Questa tecnologia trova impiego nella produzione di parti di alto livello nel settore aerospaziale e medico grazie alla finitura di alta qualità<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> [https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works/sls-3d-printing?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=generic\\_EMEA&utm\\_content=wyn&gclid=CjOKCQjw5ZSWBhCVARisALERCvwOtj8V99Uj-EHC2gT4O0qt\\_1loNZASL526h6SEfWRzvsDg-CgNKYMaAs5tEALw\\_wcB](https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works/sls-3d-printing?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=generic_EMEA&utm_content=wyn&gclid=CjOKCQjw5ZSWBhCVARisALERCvwOtj8V99Uj-EHC2gT4O0qt_1loNZASL526h6SEfWRzvsDg-CgNKYMaAs5tEALw_wcB)

<sup>8</sup> <https://www.engineeringclicks.com/electron-beam-melting-ebm>

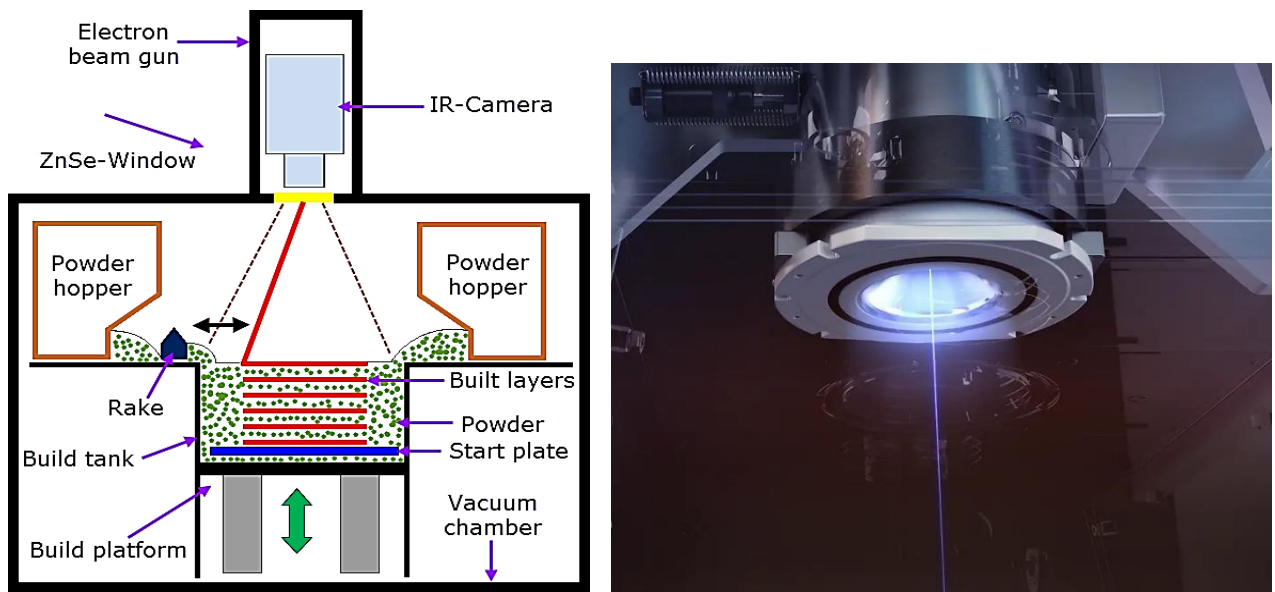


Figura 2.3 (a sinistra) Diagramma schematico di un processo EBM; (a destra) Rappresentazione pistola del fascio di elettroni.

Tecnologia	Vantaggi	Svantaggi
Powder Bed Fusion (PBF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativamente economico</li> <li>• Adatto per modelli visivi e prototipi</li> <li>• La polvere funge da struttura di supporto integrata</li> <li>• Ampia gamma di scelta per il materiale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mancanza di proprietà strutturali nei materiali</li> <li>• Limiti nelle dimensioni</li> <li>• Consumo elevato di energia</li> <li>• La finitura dipende dalle dimensioni del grano cristallino della polvere</li> </ul>

Tabella 2.1 Vantaggi e svantaggi della tecnologia PBF.

## 2.1.2 Binder Jet Printing (BJP)

Binder Jet Printing (BJP) si basa sull'utilizzo di due materiali: un materiale a base di polvere e un legante. In base a come si modificano i rapporti e le proprietà dei due materiali, si può ottenere una vasta gamma di soluzioni polvere-legante. Il legante, solitamente in forma liquida, viene considerato in questo processo come adesivo tra gli strati di polvere. Una testina di stampa si sposta orizzontalmente lungo gli assi della macchina depositando strati alternati del materiale di costruzione e del legante. La deposizione del legante, in particolare, avviene in micro quantità mentre la quasi totalità della massa dell'oggetto viene realizzata dal materiale a base di polvere. Al completamento di ogni strato, l'oggetto viene abbassato sulla sua piattaforma di costruzione. Anche in questo caso, come in altri metodi a base di polvere, l'oggetto che si deve stampare non necessita di strutture di supporto aggiuntive. Il processo può essere accelerato aumentando il numero di fori della testina di stampa adibita al deposito del materiale (Figura 2.4). I processi di post-produzione permettono di rafforzare l'oggetto e di conferire al legante migliori proprietà strutturali e meccaniche; tuttavia risultano con tempi elevati visto che il legante presenta tempi di raffreddamento molto lunghi (Tabella 2.2).

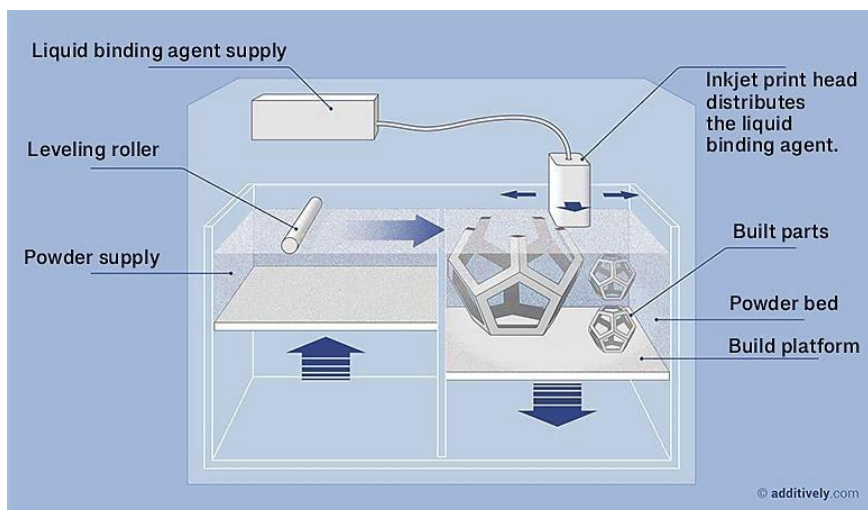


Figura 2.4 Funzionamento processo BJP.

Tecnologia	Vantaggi	Svantaggi
Binder Jet Printing (BJP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilità di realizzare parti con colori diversi</li> <li>• Vasta gamma di materiali: metalli, polimeri e ceramiche</li> <li>• Processo più veloce di altri</li> <li>• Possibilità di avere una vasta gamma di combinazione polvere-legante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non sempre adatto per parti strutturali a causa del materiale legante</li> <li>• Fasi di post-produzione aggiungono molto tempo al processo generale</li> </ul>

*Tabella 2.2 Vantaggi e svantaggi tecnologia BJP.*

### 2.1.3 Direct Energy Deposition (DED)

Direct Energy Deposition (DED) è un processo di stampaggio complesso utilizzato per riparare o aggiungere materiale ai componenti esistenti.

Una macchina DED è costituita da un ugello montato su un braccio multiasse, il quale deposita il materiale da qualunque angolazione fuso sulla superficie specificata, solidificandosi. L'ugello possiede la capacità di spostarsi in più direzioni non essendo fissato ad un asse specifico. Il materiale si fonde al momento della deposizione con un raggio laser o elettronico, il tutto all'interno di una camera controllata con livelli di ossigeno veramente ridotti (Figura 2.5). I tipi di materiali utilizzati per questo processo riguardano polimeri, ceramiche e principalmente metalli, sotto forma di polvere o filo. I processi DED trovano impiego in applicazioni come riparazione e manutenzione di parti strutturali<sup>9</sup>. I tempi di raffreddamento del materiale sono molto rapidi e vanno a caratterizzare la struttura finale del grano cristallino del materiale che è stato depositato (Tabella 2.3).

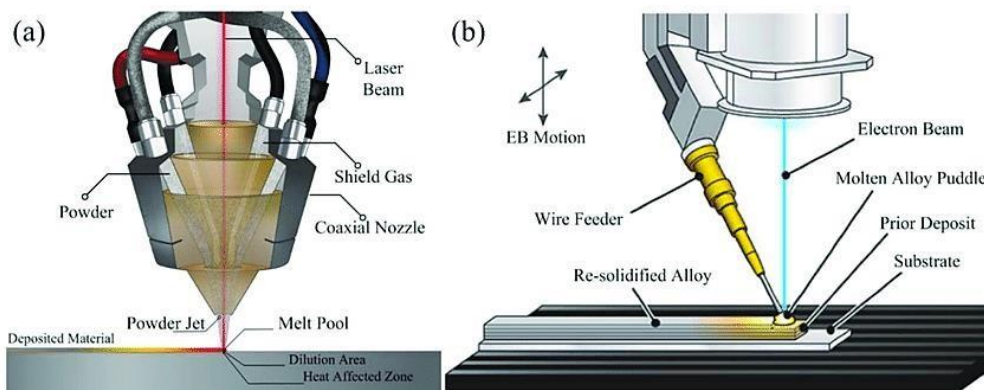


Figura 2.5 Esempi di processi DED a) tecnologia DED con l'utilizzo del fascio laser come sorgente di energia b) tecnologia DED con l'utilizzo del fascio di elettroni come sorgente di energia.

<sup>9</sup> <https://www.rpm-innovations.com/repair-directed-energy-deposition.html>



Tecnologia	Vantaggi	Svantaggi
<p style="text-align: center;">Direct Energy Deposition (DED)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacità di controllare la struttura del grano cristallino per rendere di alta qualità la riparazione di parti funzionali</li> <li>• Serve un equilibrio tra qualità della superficie e velocità, sebbene la velocità possa essere sacrificata per un'elevata precisione nella riparazione di parti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le finiture possono variare a seconda della carta o del materiale plastico</li> <li>• Utilizzo del materiale limitato</li> <li>• I processi di fusione richiedono più ricerca per far avanzare ulteriormente il processo</li> </ul>

*Tabella 1.3 Vantaggi e svantaggi della tecnica di stampa 3D DED.*

## **2.2 Stampa 3D a liquido**

Tra le tecnologie principali di stampa 3D ritroviamo:

- Stereolithography (SLA)
- Digital Light Processing (DLP)

Queste due tecnologie, stampe 3D basate su resina, sono molto diffuse per la produzione di prototipi e parti ad elevata precisione.

### **2.2.1 Stereolithography (SLA)**

Il processo SLA incomincia nel momento in cui la piattaforma di stampa viene immersa in un serbatoio con all'interno della resina. Un laser viene puntato verso due galvanometri sistemati a specchio, che hanno il compito di dirigere la luce su una serie di specchi, portando il fascio di luce verso il fondo del serbatoio di resina polimerizzandone uno strato. La fase appena descritta viene chiamata fotopolimerizzazione. Successivamente, si separa lo strato dal fondo del serbatoio. Infine, la piattaforma di stampa si sposta verso l'alto facendo passare al di sotto della resina fresca. Questo processo viene ripetuto fino al completamento dello stampaggio dell'oggetto in resina.

Il processo SLA presenta un alto livello di precisione e una buona finitura; tuttavia, richiede strutture di supporto e una fase successiva di polimerizzazione per garantire all'oggetto una resistenza idonea per l'uso strutturale. Delle lame di ricopertura eliminano i difetti degli strati precedenti garantendo il corretto processo di polimerizzazione anche per gli strati successivi (Figura 2.6).

Nelle fasi di post-produzione vengono rimosse eventuali resine in eccesso e si rimuovono i supporti facendo attenzione a non contaminare la resina. Queste parti vengono rimosse grazie a risciacqui con alcol e un successivo risciacquo con acqua. Queste fasi possono risultare anche molto lunghe. Infine, le parti vengono asciugate.

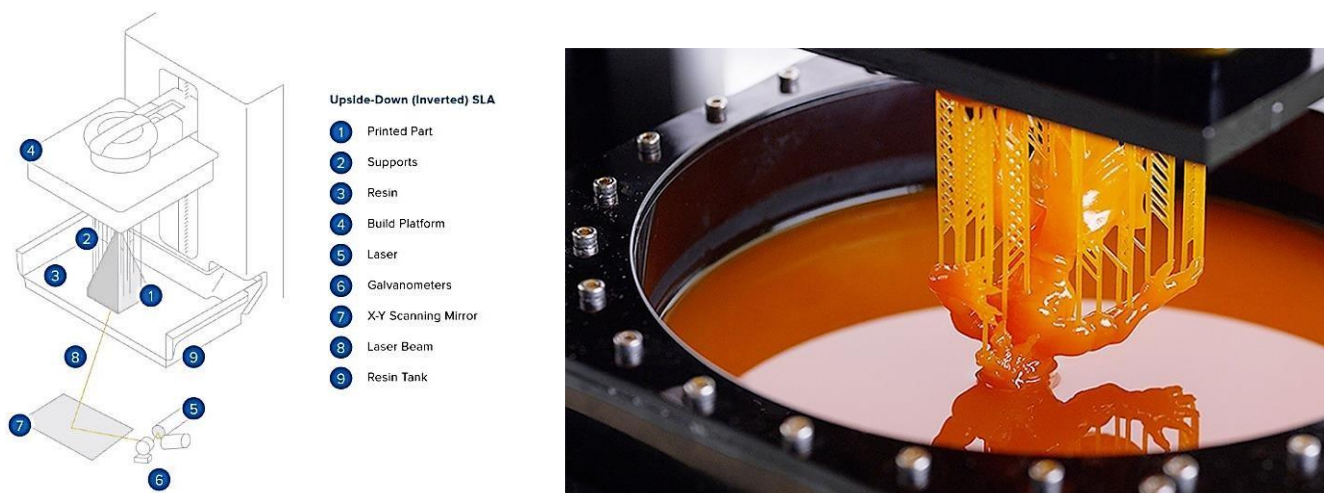


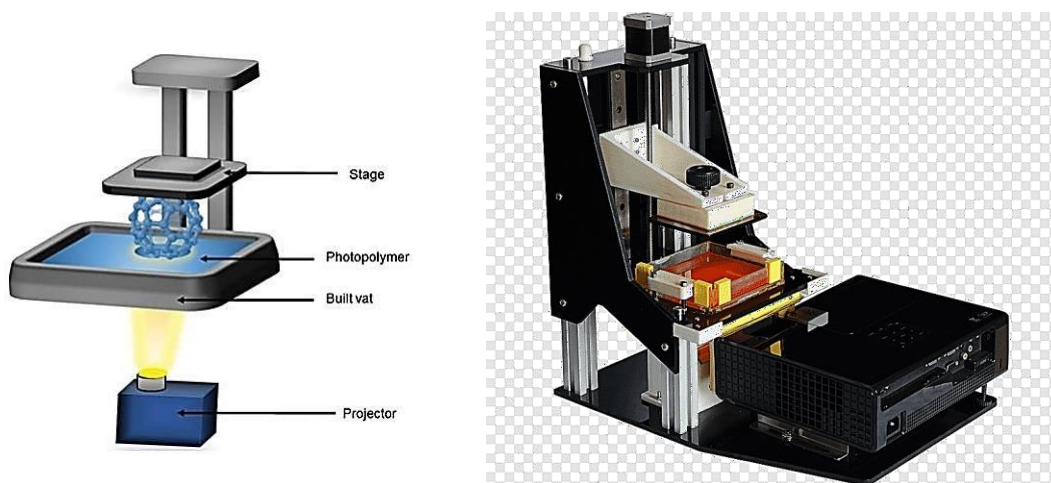
Figura 2.6 (a sinistra) Diagramma di funzionamento del processo SLA; (a destra) Raffigurazione di un oggetto realizzato in resina tramite SLA.

Tecnologia	Vantaggi	Svantaggi
Stereolithography (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevato livello di precisione e buona finitura</li> <li>• Processo relativamente veloce</li> <li>• Aree di costruzione tipicamente grandi fino a un peso massimo di 200 Kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativamente costoso</li> <li>• Lunghi tempi di post-produzione e rimozione della resina</li> <li>• Utilizzo limitato di foto-resine</li> <li>• Richiesta di strutture di supporto e post-polimerizzazione</li> </ul>

Tabella 2.4 Vantaggi e svantaggi della tecnologia SLA.

## 2.2.2 Digital Light Processing (DLP)

Digital Light Processing (DLP) è un processo di AM caratterizzato dal fatto che gli oggetti vengono creati da una stampante 3D che utilizza un proiettore di luce digitale per la polimerizzazione dei polimeri fotoreattivi. Il processo inizia nel momento in cui viene inviato il modello alla stampante, una vasca di polimero liquido viene esposta alla luce di un proiettore DLP. Quest'ultimo visualizza l'immagine del modello 3D sul polimero. A sua volta il polimero che risulta esposto si indurisce e la piattaforma di costruzione si muove verso il basso. Di conseguenza, il polimero liquido viene nuovamente esposto alla luce. Questo processo viene ripetuto fino al completamento del modello 3D. Successivamente la vasca viene svuotata del liquido, mostrando il modello solidificato (Figura 2.7). La stampa 3D attraverso DLP risulta più veloce e permette di stampare oggetti con un'alta risoluzione. Facendo un confronto con la tecnologia SLA, si giunge alla conclusione che le stampanti 3D DLP dovendo ospitare il proiettore vero e proprio, tendono ad avere dimensioni maggiori rispetto alle controparti SLA. Inoltre, la stampante 3D DLP non ha una maturità di utilizzo e sviluppo tale da potersi sostituire alle tecnologie SLA. Le applicazioni in questo campo riguardano proiettori cinematografici, telefoni cellulari e stampa 3D<sup>10</sup>.



*Figura 2.7 (a sinistra) Diagramma di funzionamento di un processo DLP; (a destra) Raffigurazione di una stampante 3D DLP.*

<sup>10</sup> <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout>

Tecnologia	Vantaggi	Svantaggi
<p style="text-align: center;">Digital Light Processing (DLP)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estremamente rapido perché non lavora punto per punto</li> <li>• Permettono di realizzare oggetti fino a 5 micron quindi più grandi rispetto a SLA</li> <li>• Necessitano di un quantitativo di materia prima inferiore rispetto a SLA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parti stampate fragili e a rischio deterioramento se esposti al sole</li> <li>• Qualità dell'immagine inferiore rispetto a SLA</li> </ul>

*Tabella 2.5 Vantaggi e svantaggi di DLP.*

### 2.3 Stampa 3D a solido

Sicuramente la più importante e nota tecnologia di stampa 3D a solido è rappresentata da Fused Deposition Modelling (FDM) basata sull'utilizzo di polimeri termoplastici che vengono fusi attraverso un estrusore.

Il processo di stampaggio 3D avviene grazie all'estrusione, ad una temperatura adeguata, di due filamenti generalmente di materiale termoplastico all'interno di un ugello preriscaldato adibito alla fusione del materiale. Il sistema è caratterizzato dalla presenza di tre assi che permettono di spostare l'estrusore lungo gli assi XY depositando il materiale precedentemente ricavato, in modo da formare il primo strato. Successivamente la piattaforma di costruzione scende o sale - dipende dal sistema di riferimento scelto- lungo l'asse Z andando a formare gli strati successivi. Questo ciclo di stampa viene ripetuto finché non si completa la geometria dell'oggetto realizzato strato su strato (Figura 2.8-2.9). Nella fase di post-produzione vengono rimossi i supporti. Questa fase avviene prima con una rimozione piuttosto grossolana a livello manuale e in seguito il materiale residuo viene sciolto immergendolo dentro una vasca contenente una soluzione di soda caustica e acqua.

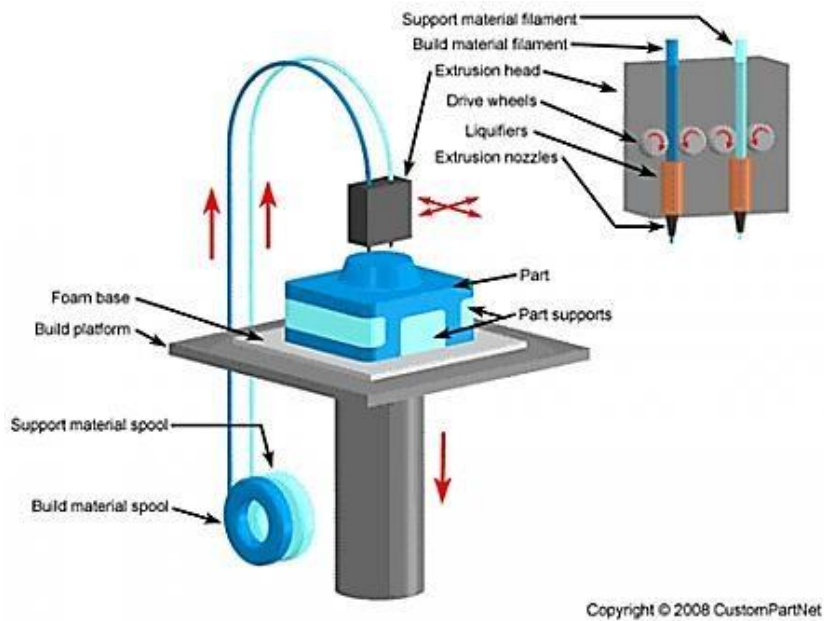


Figura 2.8 Diagramma di funzionamento per la stampa 3D FDM.

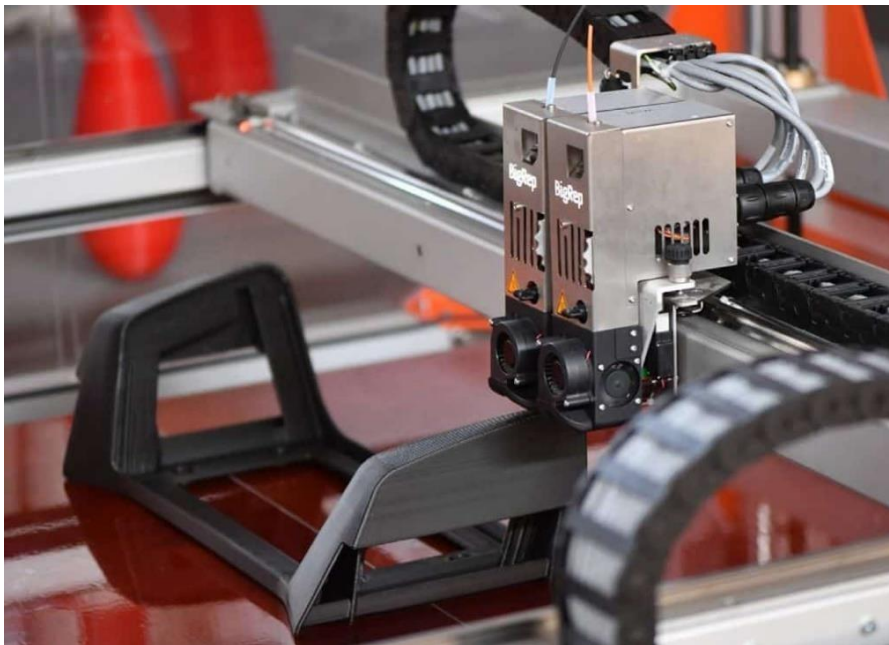


Figura 2.9 Raffigurazione di una stampante 3D FDM.

Tecnologia	Vantaggi	Svantaggi
<p>Fused Deposition Modelling (FDM)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficienza sui costi: visti i materiali di stampa più economici e disponibili</li> <li>• Tempi rapidi: non si hanno tempi di ritardo neppure nella stampa di grandi lotti</li> <li>• Possibilità di produrre stampe completamente colorate: sono disponibili più di 40 tonalità di colore e in più il colore del filamento è proprio il colore dell'oggetto finale</li> <li>• Minor spreco di materiale: non vi è alcuno spreco dato che la stampa fonde il filamento e lo solidifica</li> <li>• Ampia varietà di materiali: sono disponibili oltre 10 varietà di filamenti di plastica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Passaggio tra gli strati significativo: le superfici delle parti stampate non è liscia come invece accade in SLA. Fasi di post-produzione sono necessari e costa di più</li> <li>• Sbavature sui piccoli dettagli: non adatta a oggetti con dettagli piuttosto complessi dato che la precisione e la risoluzione è tra le più basse per quanto riguarda le stampe 3D.</li> </ul>

*Tabella 2.6 Vantaggi e svantaggi della tecnologia FDM.*

### 3. AM PER COMPONENTI DI MACCHINE ELETTRICHE

A livello di design e di produzione, una macchina elettrica può essere suddivisa in due sottoinsiemi:

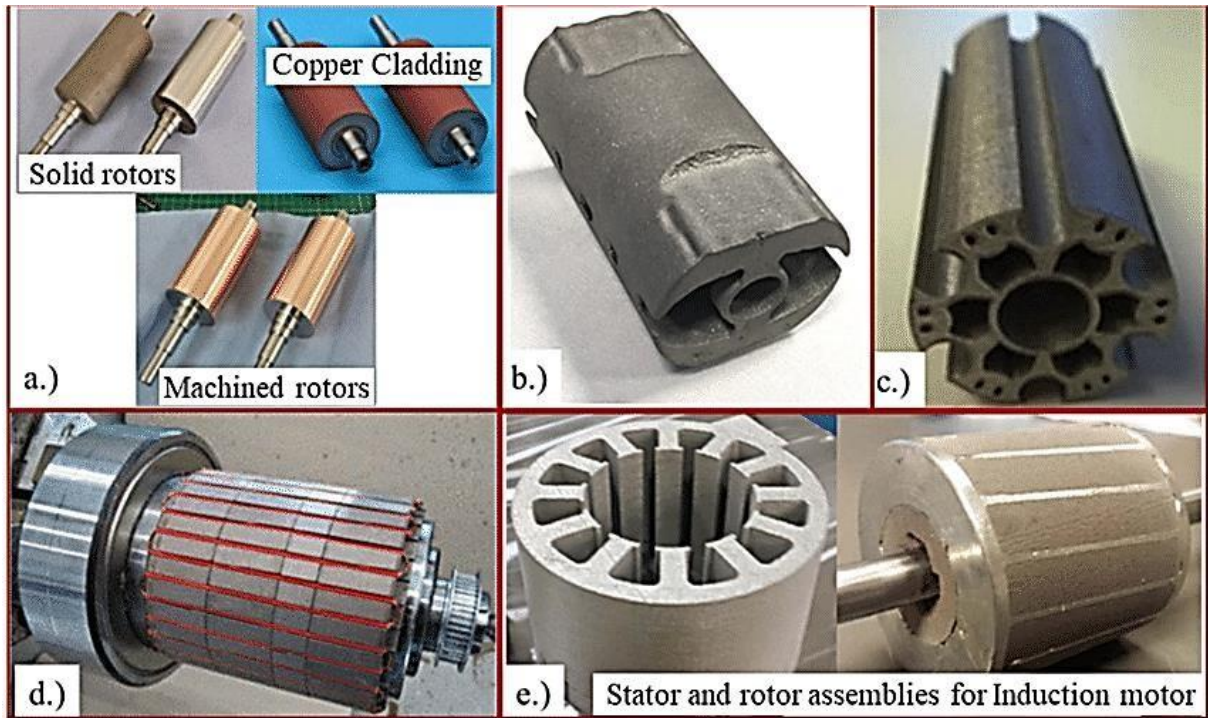
- Parti attive come il nucleo, gli avvolgimenti delle bobine e magneti permanenti
- Parti passive come le componenti di monitoraggio termico e meccanico

#### 3.1 Nucleo

Il nucleo rappresenta il corpo principale di una macchina elettrica e viene usato per confinare e guidare il campo magnetico. I parametri chiave per un nucleo di ferro che vanno assolutamente presi in considerazione sono: saturazione magnetica  $J_s$ , coercitività intrinseca  $H_c$ , permeabilità relativa  $\mu_r$ , densità delle perdite per isteresi  $p_h$ , perdite dinamiche  $p_e$  e la forza di resa. A livello di design e di costruzione bisogna assolutamente tenere presente proprietà magnetiche quali saturazione magnetica, permeabilità, perdite per isteresi, perdite per correnti parassite e proprietà meccaniche. Per poter ottenere le migliori proprietà elettromagnetiche vengono utilizzate leghe intermetalliche e SMMs (Soft Magnetic Materials) che verranno approfonditi più avanti. Questi tipi di materiale risultano piuttosto complicati da produrre attraverso le tecniche convenzionali, mentre grazie alla flessibilità dell'AM si riescono a realizzare geometrie complesse e a selezionare i compositi del materiale (Figura 3.1). Questo permette di avere un buon controllo sulle proprietà meccaniche ed elettromagnetiche.

Questa abilità dell'AM di realizzare differenti ottimizzazioni in questo campo è il motivo per il quale viene utilizzata per produrre nuclei con geometrie specializzate che permettano di guidare in modo ottimale il campo magnetico nelle macchine elettriche.





*Figura 3.1 Esempi di nuclei costruiti tramite AM a) rotore in acciaio pieno con rivestimento in rame per veicoli elettrici Rolls-Royce. b) rotore a magneti permanenti con densità di coppia ottimizzata c) prototipo di rotore per una macchina a riluttanza commutata d) rotore leggero che utilizza una struttura reticolare per una macchina sincrona a magneti permanenti e) statore e rotore di una macchina a induzione per il settore automotive.*

### 3.1.1 Soft Magnetic Materials

*Soft Magnetic Materials (SMMs)*, sono caratterizzati da una coercitività elettrica bassa e possono essere facilmente magnetizzati e smagnetizzati. Durante la fase di design di un nucleo di ferro risulta di fondamentale importanza la scelta corretta del SMMs. Per le macchine elettriche, convenzionalmente, i nuclei di ferro sono realizzati mediante laminazione. Le laminazioni in acciaio sono, generalmente, formati da ferro legato con silicio, nickel, cobalto e altri additivi. Nei nuclei completamente laminati lo spreco di acciaio dovuto dal taglio e pressione delle laminazioni si aggira tra il 50% e l'80%.

Un'altra soluzione può essere quella di realizzare i nuclei con i *Soft Magnetic Composites (SMCs)*. Essendo prodotti tramite compattazione e modellatura delle parti in ferro in forme desiderate, possono richiedere meno manipolazione meccanica e fasi di post-produzione. SMCs per una macchina elettrica risultano molto vantaggiosi in condizioni di alta velocità. Tuttavia, le alte perdite per isteresi, l'alta coercitività intrinseca, la bassa permeabilità relativa e la bassa forza di resa ne limitano fortemente le applicazioni di utilizzo. *Soft Magnetic Materials* hanno permesso una nuova strada per la fabbricazione di nuclei di ferro tramite le tecniche dell'AM. Di seguito vengono mostrati esempi di nuclei di ferro realizzati tramite le tecniche AM (Figura 3.2).



**Figura 3.2** Nuclei di rotore realizzati tramite AM a) nucleo di rotore stampato per una macchina a riluttanza sincrona b) nucleo di rotore stampato per una macchina a riluttanza commutata.

I tre principali SMMs usati sono:

- Ferro-Cobalto (FeCo)
- Ferro-Nickel (FeNi)
- Ferro-Silicio (FeSi)

### **3.1.1.1 Ferro-Cobalto (FeCo)**

Una delle proprietà più interessanti per FeCo è l'alta saturazione magnetica che si aggira attorno ai 2.4 T rispetto alle altre leghe metalliche dei SMMs.

FeCo prodotto con tecnologie convenzionali mostra un alto costo di cobalto in termini di materiale, una bassa lavorabilità della lega metallica e la necessità di avere un sistema di gestione termico. Questi limiti possono essere superati grazie alle tecniche dell'AM e più in particolare utilizzando Laser Engineered Net Shaping Technologies (LENS). Si arriva così ad avere un'induzione magnetica comparabile con le leghe FeCo commerciali con il 15-20% del contenuto di cobalto. Inoltre, si ottiene una saturazione magnetica con valori di circa 2.2-2.3 T molto vicini a quelli delle leghe FeCo commerciali che hanno valori di circa 2.4 T. Se integrassimo al nucleo di FeCo un sistema di gestione della temperatura, aumenterebbe la massima permeabilità relativa di circa il triplo e diminuirebbe la coercitività intrinseca di circa i due terzi.

### **3.1.1.2 Ferro-Nickel (FeNi)**

Rispetto alle leghe di Ferro-Cobalto, le leghe di Ferro-Nickel presentano una permeabilità magnetica massima molto più alta. Generalmente per la realizzazione delle leghe Fe-Ni tramite AM vengono utilizzate come tecniche SLM e LENS, basate entrambe sull'uso del laser. Le caratteristiche del laser, in particolare potenza e velocità di scansione, influenzano significativamente la granulometria e la densità delle parti fabbricate andando a cambiare la saturazione magnetica. Le combinazioni che mostrano maggiore potenzialità sono quelle con concentrazione di nickel al 30% e all'80%.

Nell'articolo "Tuning the phase stability and magnetic properties of laser additively processed Fe-30at%Ni soft magnetic alloys" tratto dal giornale ISSN, viene mostrato che, nel caso di Fe-

30%Ni prodotto tramite SLM, un incremento della velocità di scansione porta ad un incremento superiore al 20 % in termini di saturazione magnetica, mentre per Fe-80%Ni ad un aumento della velocità di scansione del laser corrisponde una diminuzione della saturazione magnetica.

I problemi principali per leghe Fe-Ni realizzate tramite SLM e LENS riguardano la coercitività intrinseca  $H_c$  piuttosto alta con valori compresi tra 80 A/m e 3000 A/m. Un'alta coercitività intrinseca produce alte perdite per isteresi e ha un impatto negativo sulla permeabilità magnetica massima. Una riduzione di  $H_c$  può essere effettuata migliorando le caratteristiche del laser in modo da eliminare le imperfezioni microstrutturali che si vengono a creare durante la fase di stampaggio. In alternativa la coercitività può essere ridotta mediante l'aggiunta di additivi come per esempio il Vanadio alle leghe di Fe-Ni.

### **3.1.1.3 Ferro-Silicio (FeSi)**

Le leghe di Ferro-Silicio utilizzate per la fabbricazione di nuclei di macchine elettriche presentano, in termini di prestazioni, un'alta saturazione magnetica, un'alta permeabilità relativa massima, una bassa coercitività intrinseca, basse perdite per isteresi e per correnti parassite in condizioni con frequenza di eccitazione fino a un centinaio di Hertz.

Molte ricerche per lo stampaggio 3D di materiale ferromagnetico si stanno concentrando proprio sul Ferro-Silicio. Una possibile tecnica AM utilizzata per realizzare nuclei in FeSi è la *Selective Laser Melting (SLM)*. Questa tecnologia prevede l'utilizzo del laser come sorgente di energia per produrre componenti in 3D grazie anche a modelli CAD. Tuttavia, SLM introduce difetti e sollecitazioni residue sulle microstrutture delle parti stampate andando a peggiorare di conseguenza le proprietà magnetiche del FeSi. Inserendo, però, un sistema di monitoraggio termico si riescono a rimuovere, non totalmente, le sollecitazioni residue migliorando le proprietà magnetiche del FeSi come la permeabilità relativa. Il processo SLM produce un allungamento del grano cristallino nella direzione di costruzione delle parti stampate provocando un alto livello di anisotropia magnetica. Inoltre, con un'energia del laser molto alta può cambiare la struttura cristallina del FeSi ottenendo un tipo di struttura chiamata *Goss texture*, la quale è possibile osservare nei *Grain oriented electrical steel (GOES)* che verranno approfonditi più avanti.

Per risolvere i problemi legati alle sollecitazioni residue si sono analizzate altri tipi di tecniche AM. Ad esempio *Binder Jet Printing (BJP)*, tecnica che non utilizza il laser come sorgente di energia. Questo processo mostra una permeabilità relativa superiore rispetto ai SMCs commerciali. Inoltre, non usando il laser non si vengono a creare gli allungamenti del grano cristallino permettendo all'anisotropia magnetica di rimanere bassa. La permeabilità relativa massima, invece, può essere migliorata mediante l'aggiunta di sistemi di gestione termica.

### 3.1.1.4 Confronto tra SMMs

Gli sviluppi e le ricerche dell'Additive Manufacturing applicate ai SMMs sono ancora agli stadi iniziali ma già mostrano dei risultati promettenti, grazie al miglioramento delle prestazioni dovuto dalla libertà nel design offerta da AM. Le proprietà magnetiche stanno migliorando sempre di più col passare del tempo raggiungendo i livelli offerti dai SMCs commerciali (Figura 3.3).

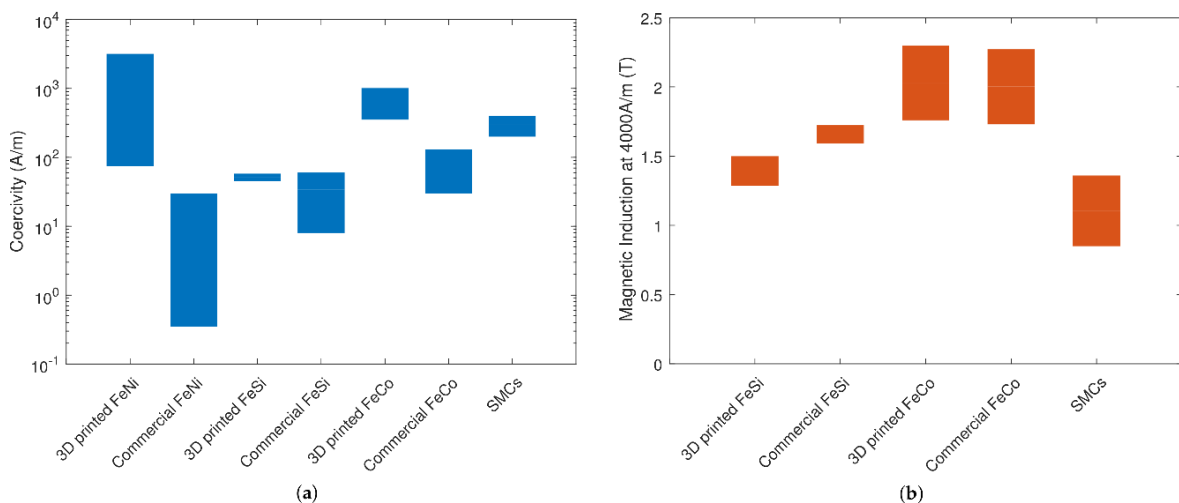
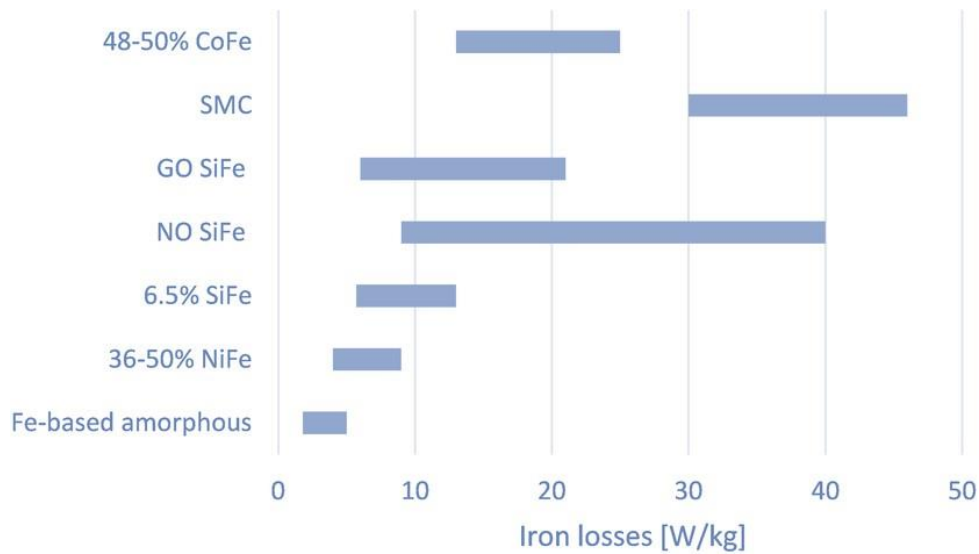


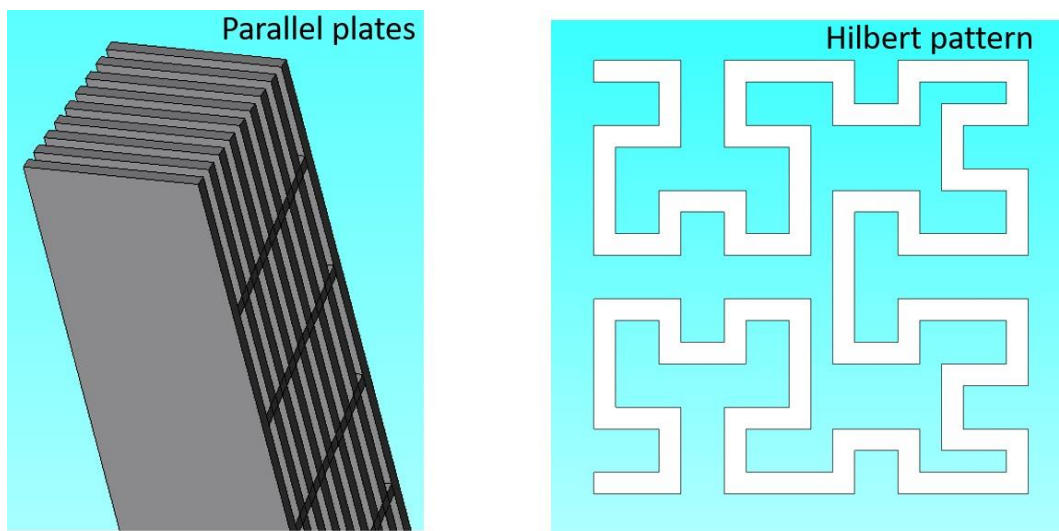
Figura 3.3 Confronto tra acciai elettrici commerciali e prodotti tramite AM a) confronto in termini di coercitività tra acciai elettrici commerciali, prodotti tramite AM e SMCs b) confronto in termini di induzione magnetica con intensità del campo magnetico a 4kA/m tra acciai elettrici commerciali, prodotti tramite AM e SMCs.

Un altro aspetto da analizzare riguarda le perdite dovuta dal ferro. Questa caratteristica è particolarmente presente soprattutto nel Ferro-Silicio prodotto tramite AM risultando paragonabile a quelle dei SMCs (Figura 3.4). Man mano che la frequenza di eccitazione aumenta, le perdite totali dovute dal ferro aumentano anch'esse in maniera esponenziale.



*Figura 3.4 Grafico raffigurante le perdite del ferro per gli acciai elettrici*

Una soluzione viene fornita tramite tecniche AM proponendo dei nuclei ferromagnetici con geometrie di sezioni trasversali complesse. Questa geometria permette proprio di interrompere i percorsi delle correnti parassite riducendo le perdite (Figura 3.5).



*Figura 3.5 Esempi di strutture geometriche di AM FeSi per la riduzione di perdite di correnti parassite. AM FeSi realizzato a piastre parallele o sezioni trasversali di Hilbert per la riduzione di perdite di correnti parassite.*

### 3.1.2 Grain-Oriented Electrical Steel

*Grain-Oriented Electrical Steel (GOES)* è un materiale importante per la produzione di trasformatori ad alta efficienza energetica, generatori ad elevate prestazioni ma con limitazioni nelle macchine rotanti. Questo materiale è caratterizzato da un forte orientamento cristallografico e da una struttura detta *Goss Texture* che predilige un'orientazione dei cristalli del materiale lungo la direzione del design del trasformatore. Questo tipo di struttura che risulta nitida si viene a formare a causa di una crescita anormale del grano cristallino durante una fase di ricottura ad alta temperatura al termine del processo di produzione.

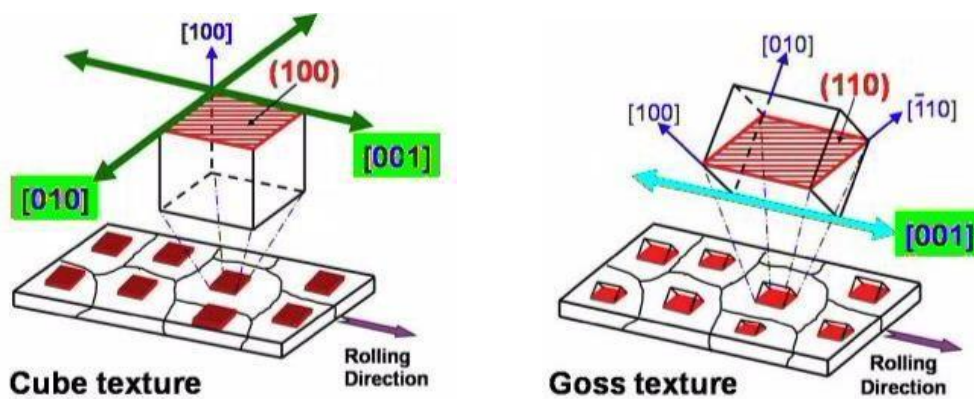


Figura 3.6 Confronto tra una struttura a cubo e una struttura Goss (la direzione è sempre perpendicolare al piano cristallografico)

Le caratteristiche e potenzialità interessanti dei GOES, che ottimizzano l'anisotropia di forma e la struttura cristallografica, si notano quando vengono applicati alle macchine, come ad esempio ad una macchina a riluttanza sincrona. I GOES garantiscono un flusso passante costantemente attraverso un percorso parallelo alla direzione di magnetizzazione ritenuta più semplice, con conseguente minore richiesta di corrente da parte dell'avvolgimento per raggiungere lo stesso valore di induzione magnetica<sup>11</sup>.

Queste favorevoli proprietà che posseggono i GOES stanno portando e porteranno secondo le previsioni ad una sempre maggiore riduzione delle perdite di potenza<sup>12</sup> (Figura 3.7).

<sup>11</sup> <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5130151>

<sup>12</sup> [http://www.e-magnetica.pl/grain-oriented\\_electrical\\_steel](http://www.e-magnetica.pl/grain-oriented_electrical_steel)



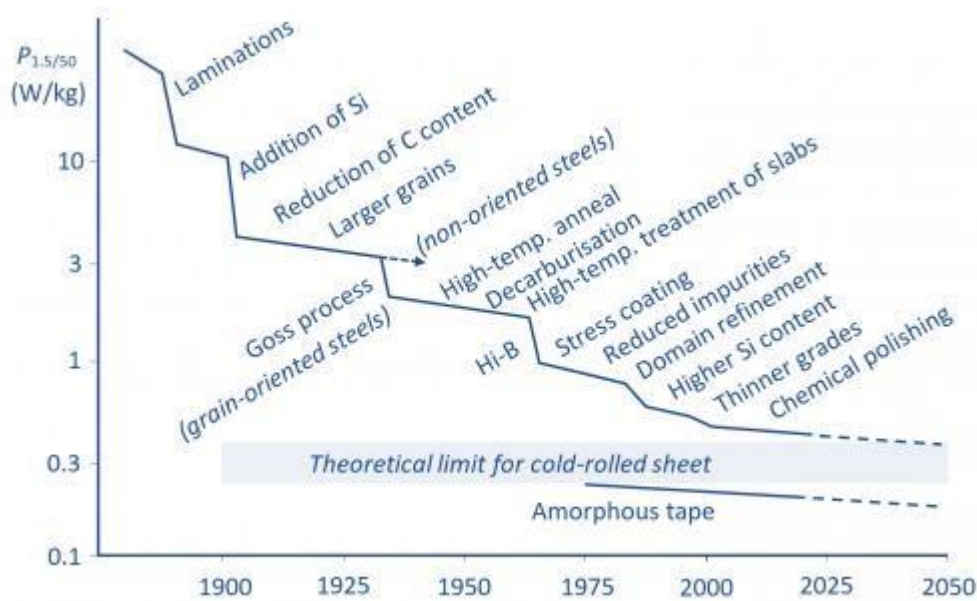


Figura 3 Progressi nella riduzione delle perdite di potenza nelle macchine elettriche utilizzando GOES specifici nel corso degli anni.

### 3.1.3 Topology Optimization

La sagomatura delle strutture magnetiche di macchine elettriche può essere distinta in 2 gruppi principali:

- Sagomatura convenzionale e tecniche di ottimizzazione
- Topology Optimization (TO)

La sagomatura convenzionale si basa su modelli matematici e analisi di sensibilità riguardo il modello geometrico di una macchina preselezionata. Le ottimizzazioni convenzionali, basate su algoritmi di ottimizzazione multi-oggetto, perfezionano la forma della struttura magnetica per migliorare le prestazioni della macchina elettrica. Quindi la creazione di queste strutture magnetiche con forme uniche risulta piuttosto lenta.

Di conseguenza subentra la *Topology Optimization (TO)* che rappresenta un processo di ottimizzazione del layout e della struttura del materiale dentro un determinato spazio di progettazione 3D per specifiche condizioni e vincoli imposte dal progettista. TO viene principalmente sfruttata per realizzare nuclei magnetici e magneti permanenti. A differenza

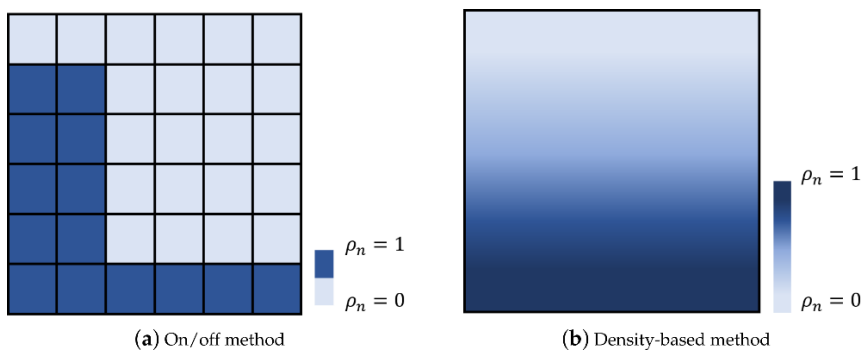


delle ottimizzazioni convenzionali, può generare un modello geometrico con meno utilizzo di analisi di sensibilità e offre flessibilità nella geometria dei componenti magnetici.

TO può utilizzare due metodi principali:

- Metodo on/off
- Metodo basato sulla densità

Nel metodo on/off lo spazio è generalmente diviso in celle, ognuna delle quali rappresenta una variabile, alla quale può essere assegnato uno zero o un uno. Questi due valori rappresentano rispettivamente l'assenza e la presenza del materiale (Figura 3.8).



**Figura 3.8** Due metodi TO per nuclei magnetici.  $\rho_n$  rappresenta la variabile di densità normalizzata.

Il modello della distribuzione del materiale può essere dedotto tramite funzioni oggetto e algoritmi basati su gradiente. Pertanto il design ottenuto con ottimizzazione on/off presenta una struttura geometrica non convenzionale.

Un TO on/off è modificato per avere una distribuzione ottimale dei SMMs per un nucleo di rotore di una macchina a magneti permanenti grazie all'algoritmo TO e successivamente viene levigata la forma del design attraverso di metodi basati su gradiente (Figura 3.9).

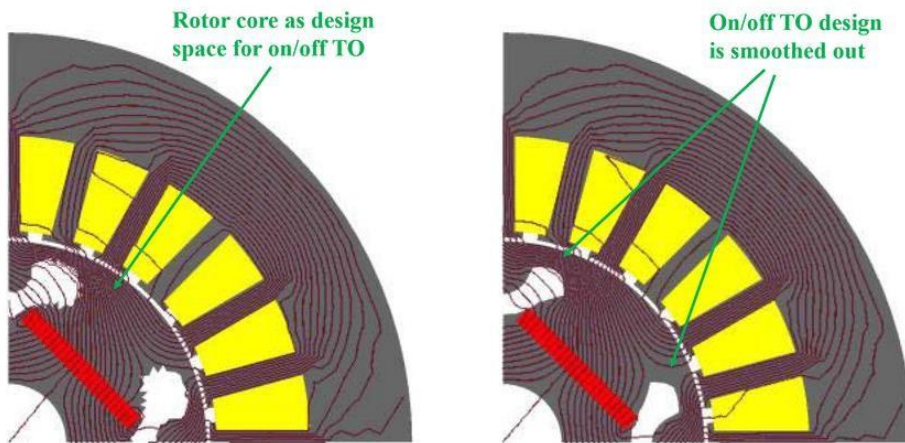


Figura 4 Esempio di nucleo di rotore per una macchina a magneti permanenti realizzata mediante algoritmi di TO on/off.

A differenza del metodo on/off, il metodo basato sulla densità associa alla variabile densità  $\rho_n$  valori continui compresi tra zero e uno, come si nota dalla Figura 19b. Un'applicazione interessante del metodo basato sulla densità riguarda il nucleo di rotore di una macchina sincrona a magneti permanenti. In questo caso, il metodo di TO scelto mira a massimizzare la coppia media mentre viene limitato il *ripple* della coppia e la coppia di cogging (Figura 3.10).

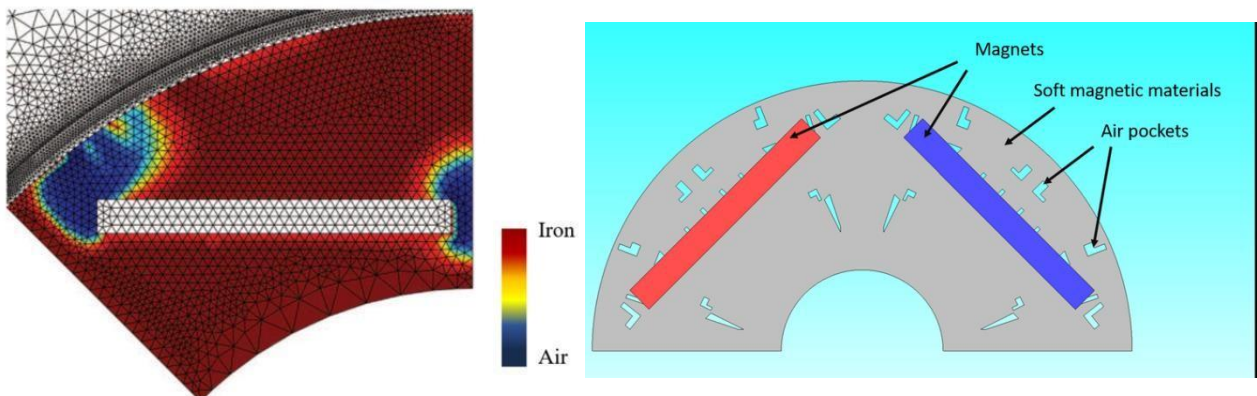


Figura 3.10 TO basata sulla densità per il nucleo di rotore di una macchina sincrona a magneti permanenti. Le aree bianche rappresentano i magneti permanenti, mentre le parti rosse scure e quelle blu scuro rappresentano il ferro e l'aria rispettivamente. Tra queste due si trovano regioni con valori di densità intermedi (sinistra). Le regioni in ferro adiacenti alle sacche d'aria e i magneti possono essere soggetti ad alte sollecitazioni meccaniche (destra).

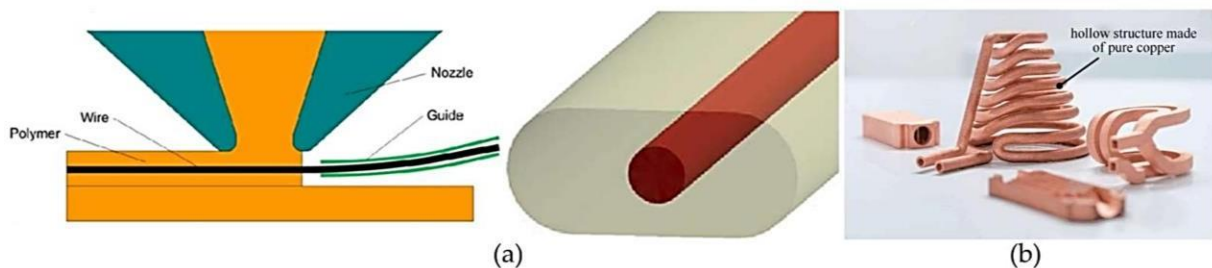
## 3.2 Avvolgimenti e bobine

Gli avvolgimenti delle bobine sono responsabili della produzione di campo magnetico nelle macchine elettriche. Per il montaggio vengono utilizzati avvolgimenti, materiale per l'isolamento elettrico e assemblaggio strutturale.

La tecnologia AM può offrire soluzioni di design innovativi per gli avvolgimenti andando a sostituire alle linee convenzionali. L'Additive Manufacturing mostra delle ottimizzazioni come:

- Alta flessibilità, potendo avere un design della sezione della bobina con un maggiore fattore di riempimento dello spazio e un migliore comportamento termico.
- La possibilità di personalizzare fino al 50% della lunghezza degli avvolgimenti finali. Questo porta la macchina ad una riduzione in termini di peso e volume.
- Alcune tecniche consentono lo stampaggio dell'avvolgimento e dell'isolamento contemporaneamente.
- Ottenere una temperatura di funzionamento più alta mediante materiali resistenti alla temperatura allo stato di polvere come ceramiche.
- Controllare le proprietà elettriche degli avvolgimenti adattando la microstruttura del materiale o miscelando materiali differenti.

Una soluzione molto interessante è rappresentata dall'integrazione dei conduttori cavi in rame, prodotti tramite AM, con il canale di raffreddamento grazie alla tecnica *AM Fiber Encapsulation* in modo da proporre una soluzione efficace al problema della dissipazione di calore di una macchina elettrica (Figura 3.11).

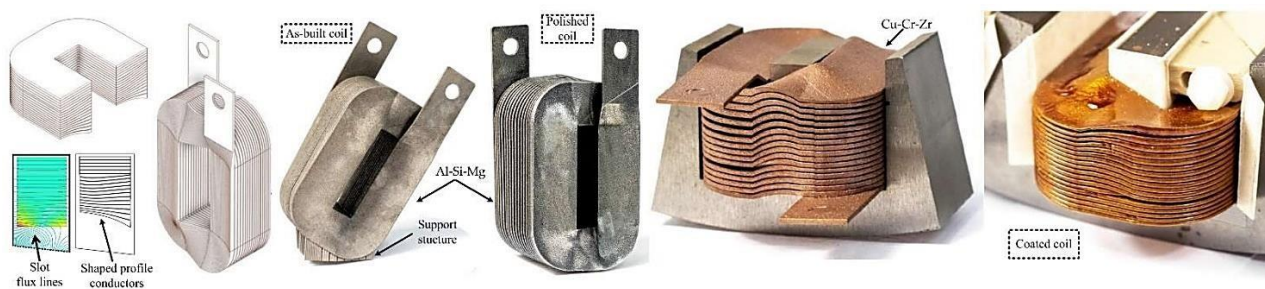


**Figura 3.11** Conduttori AM a) integrazione di fili dentro l'isolamento tramite *AM Fiber Encapsulation* b) conduttori cavi realizzati tramite stampaggio 3D per migliorare la capacità di raffreddamento.

Le bobine di conduttori cavi vengono prodotti tramite Direct Metal Laser Sintering (DMLS) usando due tipi di materiale uno in lega di rame CuCrZr e l'altro in lega d'alluminio AlSiMg. A differenza del rame e alluminio puro realizzato mediante AM, queste leghe presentano proprietà meccaniche migliori come la resistenza alle forti vibrazioni che ne conferiscono un principale utilizzo nel settore aerospaziale. Inoltre, i conduttori vengono realizzati rimanendo paralleli alle linee di flusso magnetico in modo da ridurre le perdite di corrente alternata.

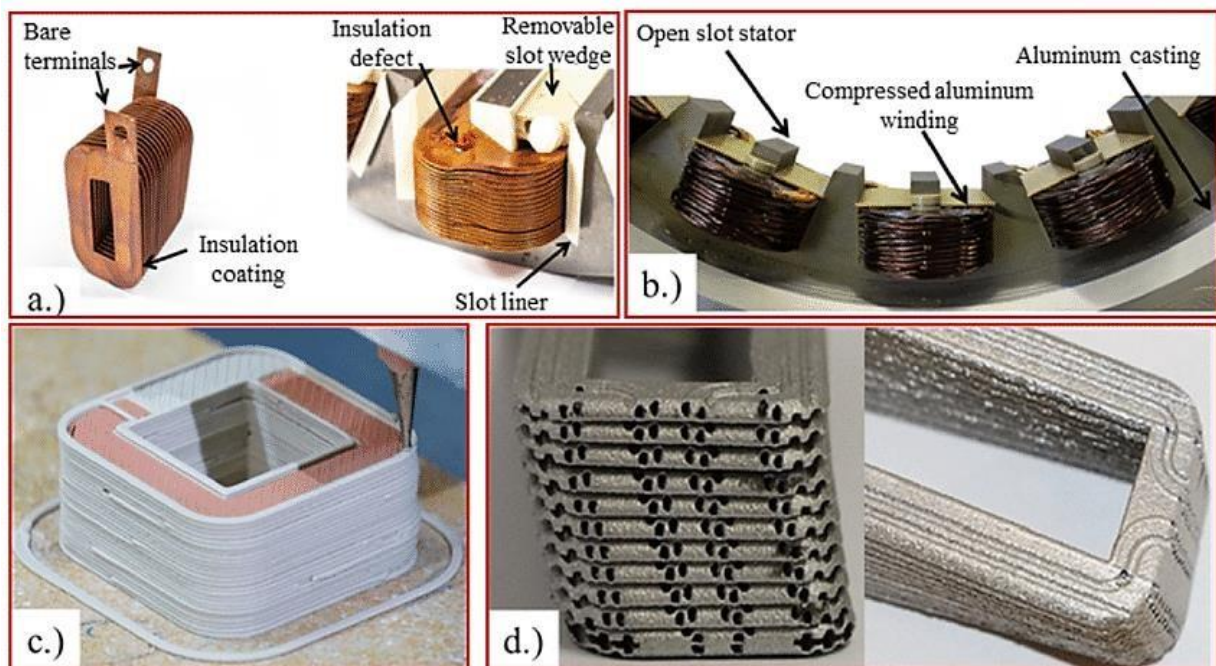
L'importante, a livello di design e costruttivo, è mantenere le perdite di potenza minime. Ciò è ottenibile tramite una resistività elettrica bassa e un elevato fattore di riempimento del conduttore. Queste caratteristiche denotano un ottimo design dell'avvolgimento delle bobine. Viste le alte richieste di velocità e frequenza di operazione, le perdite associate ad effetto pelle e di prossimità dominano e complicano il design degli avvolgimenti (Figura 3.12).

Come esposto dall'estratto "Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines." Tratto dalla rivista IEEE Transactions on Magnetics, realizzare profili specifici per gli avvolgimenti permette, oltre a un uso migliore dell'area a disposizione, di minimizzare le perdite di corrente alternata mostrando, attraverso i risultati sperimentali, ad un miglioramento del 20% nell'uscita nel caso di funzionamento continuo.



**Figura 3.12** Profilo delle bobine realizzate mediante AM con basse perdite di corrente alternata per una macchina elettrica che opera in condizioni di alta velocità.

Un'altra soluzione potrebbe essere quella di realizzare l'avvolgimento attraverso MM-AM, ovvero utilizzando i multimateriali con le tecniche dell'AM. In questo tipo di applicazione gli avvolgimenti sono integrati con gli scambiatori di calore. Quest'ultimi sono realizzati mediante stampaggio usando 3 materiali: rame puro, argento puro e leghe di rame-argento. Utilizzando i multimateriali si arriva a eliminare le fasi di post-produzione e a raggiungere densità di corrente più alte (Figura 3.13).



**Figura 3.13 Esempi di avvolgimenti costruiti tramite AM: (a,b) profilo sagomato costruito con AM, avvolgimento isolato elettricamente c) montaggio degli avvolgimenti costruiti tramite MM-AM con isolamento ceramico integrato d) avvolgimento con bobina dentata costruita tramite AM con canali integrati a raffreddamento a liquido.**

Degli esempi di implementazione riguardo la realizzazione di bobine ad alte prestazioni mediante lo stampaggio 3D vengono rappresentati negli articoli “Racing Engine with 3D-Printed Coils” e “3D-Printed Hairpin Windings for E-traction Motors” tratti dalla pagina web “Additive Drives”<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> <https://www.additive-drives.de>

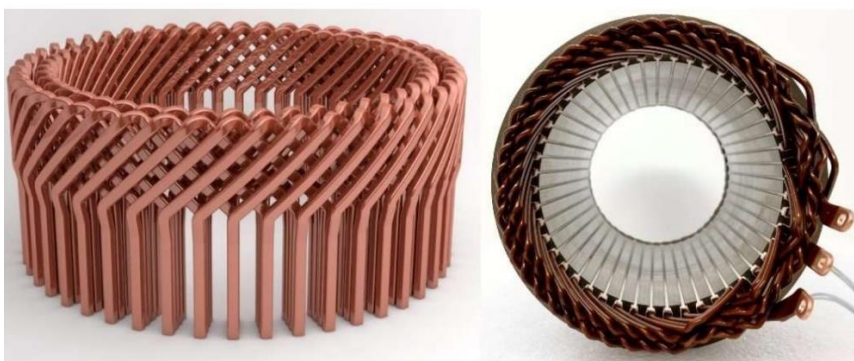


Nel primo articolo viene esposta la realizzazione mediante stampa 3D di una singola bobina ad alte prestazioni per l'applicazione di motori da corsa. Grazie ad una forma geometrica perfetta, viene forzato il trasferimento di calore dagli avvolgimenti al nucleo, prevenendo fenomeni di hotspot e le bobine presentano il massimo fattore di riempimento del rame. Tutto ciò porta ad un aumento della densità di potenza del 45% (Figura 3.14).



*Figura 3.14 Avvolgimento di bobina ad alte prestazioni realizzato tramite stampa 3D per motori da corsa.*

Mentre nel secondo articolo, con un altro approccio, gli avvolgimenti sono realizzati con una forma a forcina mediante stampa 3D per applicazioni di motori a trazione elettrica. In questa struttura geometrica i fili di rame sono sostituiti da aste rettangolari in rame con metà sbalzo della testa dell'avvolgimento (Figura 3.15-3.16).



*Figura 3.15 Avvolgimenti a forcins realizzati mediante stampa 3D per motori a trazione elettrica.*

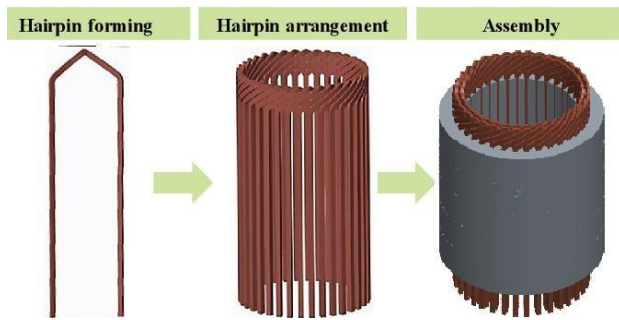


Figura 3.16 formazione della forma a forcina degli avvolgimenti e assemblaggio formando la struttura di statore

### 3.3 Magneti permanenti

I magneti permanenti (PM) risultano attualmente una risorsa di grande importanza per la costruzione di macchine elettriche con caratteristiche quali efficienza, compattezza e un elevato rapporto coppia-peso. Per poter essere integrati perfettamente in una macchina elettrica i magneti permanenti necessitano di tre caratteristiche fondamentali:

- Proprietà magnetiche ad alto funzionamento (densità di flusso residuo  $B_r$ , forza coercitiva intrinseca  $H_{ci}$  e il prodotto energetico massimo  $(BH)_{max}$ )
- Stabilità sotto le condizioni di alta temperatura
- Resistenza alla corrosione

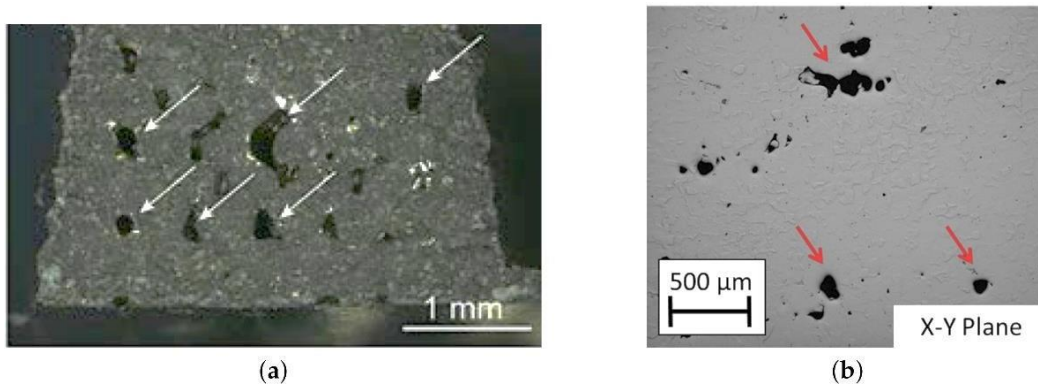
Per applicazioni con richieste di elevata densità di energia si prediligono usare dei PM formati da ad esempio NdFeB, AlNiCo e SmCo.

Nell'articolo "Additive Manufacturing and Topology Optimization of Magnetic Materials for Electrical Machines" tratto dalla rivista *Energies*<sup>14</sup>, vengono esposti gli effetti delle tecniche AM riguardo le proprietà magnetiche e meccaniche dei magneti permanenti.

Si nota che i magneti permanenti prodotti tramite la tecnica SLM (Selective Laser Melting) presentano una densità del 90%; tuttavia risultano presenti anche crepe, sollecitazioni residue e porosità che rappresentano degli aspetti negativi in particolare per le proprietà dei PM (Figura

<sup>14</sup> <https://www.mdpi.com/journal/energies>

3.17). Questi difetti riducono la permeabilità magnetica, la saturazione magnetica, la densità di flusso residuo e il prodotto energetico massimo nella realizzazione di PM stampati.



*Figura 3.17 Porosità di un magnete NdFeB realizzato con AM. Con le frecce vengono indicati i pori a) sezione trasversale di un magnete NdFeB realizzato mediante Material Extrusion b) rappresentazione pori di FeSi realizzato mediante SLM.*

Questi problemi possono essere risolti mediante processi di trattamento termico applicati sia prima che dopo la produzione.

Per la fabbricazione di magneti NdFeB sono state prese in considerazione quattro tecnologie principali:

- Powder Bed Fusion (PBF) con SLM
- Binder Jet Printing (BJP)
- Material Extrusion (tra le quali troviamo la Fused Deposition Modeling (FDM))
- Big Area Additive Manufacturing (BAAM)

Powder Bed Fusion (PBF) con SLM mostra una densità al di sopra del 90% per i magneti stampati. Tuttavia il laser può introdurre crepe e sollecitazioni residue che possono caratterizzare negativamente le proprietà magnetiche e meccaniche dei magneti. Migliorando i parametri del laser, come la potenza e la velocità di scansione, si può arrivare ad ottenere ottime prestazioni delle proprietà magnetiche e ad avere una buona distribuzione del calore.

Binder Jet Printing (BJP) è caratterizzato dal non utilizzo del laser come sorgente di energia. I magneti realizzati mediante BJP presentano una densità con valori di circa  $3.5 \text{ g/cm}^3$ , corrispondente circa al 40% del valore teorico di densità del NdFeB. Inoltre, i magneti permanenti prodotti tramite BJP presentano una necessità di incremento in volume, il quale può essere fornito grazie ad infiltrazioni di leghe eutettiche come ad esempio NdCuCo e PrCuCo, che, a sua volta, portano ad un aumento della densità magnetica e della densità di flusso residuo.



Material Extrusion, come il BJP, non utilizza il laser come sorgente di energia e consiste nel forzare per compressione il materiale allo stato pastoso nella sagoma per realizzare la forma del pezzo che si produce. Presenta caratteristiche come densità magnetica, densità di flusso residuo e coercitività intrinseca.

La tecnologia che ha mostrato i miglioramenti più significati per le prestazioni è rappresentata dalla BAAM (Big Area Additive Manufacturing). Grazie a questa tecnica si è arrivati ad un incremento del 20% della densità di flusso residuo e di densità del materiale, del 40% dell'energia prodotta rispetto al BJP e un netto miglioramento delle prestazioni di degrado termico rispetto alle altre tecniche AM utilizzate per la costruzione di magneti permanenti.

Metodo di produzione	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$B_r$ (T)	$H_{ci}$ (kA/m)	$(BH)_{max}$ (MGOe)
IM	3.85-5.7	0.22-0.68	135-463	3.3-9.4
PBF	4.12	0.55	603	7.79
BJP	3.3-3.86	0.3-0.42	700-1100	2.4-3.8
FDM	3.53	0.3	990	NA
BAAM	4.9-5.2	0.51-0.58	688-708	5.3-5.47

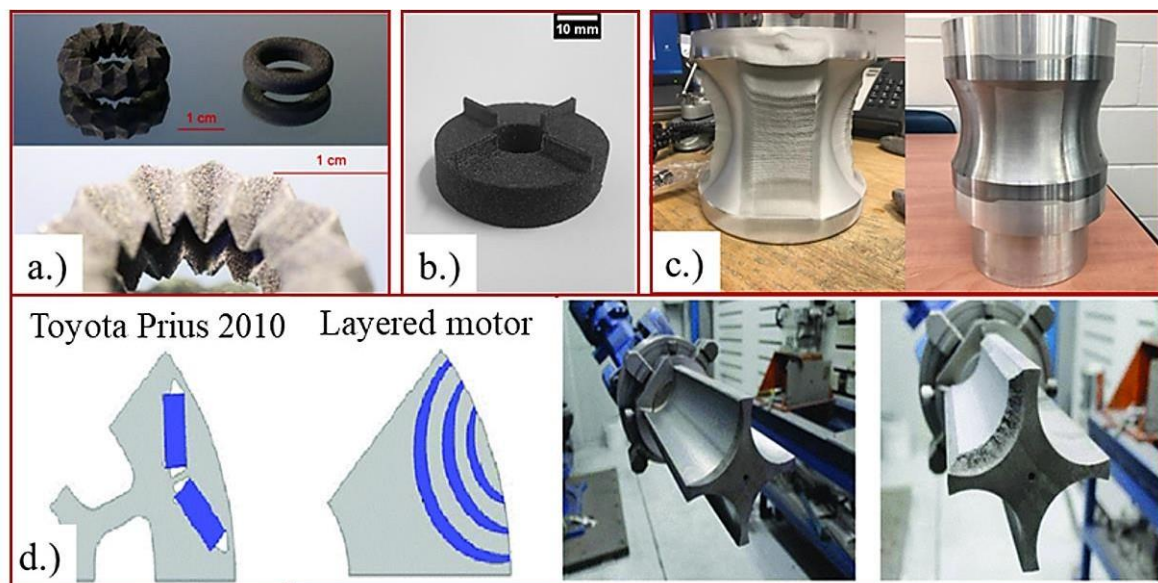
*Tabella 3.1 Confronto delle caratteristiche tra i magneti commerciali realizzati tramite Injection Molded (IM) e i magneti NdFeB realizzati tramite tecniche AM.*

I magneti AlNiCo realizzati mediante AM, utilizzati per le macchine elettriche, mostrano risultati promettenti. Grazie alla tecnologia LENS, si possono raggiungere valori di prodotto energetico massimo compresi tra il 48% e il 66.7% in confronto con i magneti AlNiCo commerciali. La particolarità è che questi valori possono essere mantenuti anche a temperature elevate. Per la forza coercitiva intrinseca si hanno valori compresi tra 140 kA/m e 160 kA/m in linea con i valori dei magneti AlNiCo commerciali, mentre per la densità di flusso residua i valori sono compresi tra 0.75 T e 0.92 T circa un 15% più bassi dei magneti in commercio.

Invece, per la produzione di magneti SmCo tramite AM le ricerche sono ancora agli stadi primordiali, principalmente focalizzate sullo stampaggio di magneti attraverso polvere

magnetica riciclata e bioplastica. I magneti prodotti presentano una bassa densità di flusso residua di circa 0.1 T.

Dalla Figura 3.18 è possibile osservare vari concept realizzare tramite AM, le cui tecniche hanno permesso di ottenere con facilità strutture geometriche complesse e una distribuzione ottimale dei multimateriali.



*Figura 3.18 Esempi di PM costruiti mediante AM: a) Realizzazione di PM a forma complessa b) magnete NdFeB prodotto mediante SLS (Selective Laser Sintering) c) forma cava in bimateriale per motori elettrici, con materiale di base come ferro e avente composito NdFeB-Al d) motore PM per veicoli ibridi, con (a sinistra) PM fabbricato a strati e (a destra) concept prodotto mediante spruzzatura a freddo.*

### 3.4 Parti passive

Le parti passive, corrispondenti alle componenti di monitoraggio termico e meccanico, comprendono il telaio della macchina, albero, strutture di raffreddamento, cuscinetti ecc...

Le tecniche AM hanno permesso ai progettisti di rivedere e sviluppare il design di queste componenti utilizzando strutture reticolari e integrando varie funzionalità insieme ottenendo un'ampia gamma di selezione dei materiali, riduzione delle dimensioni e peso delle parti strutturali. Ciò porta ad avere macchine elettriche più compatte, alta densità di potenza e una bassa inerzia per applicazioni specifiche.

Di seguito si mostrano esempi di parti per il monitoraggio termico e meccanico dal design unico (Figura 3.19).

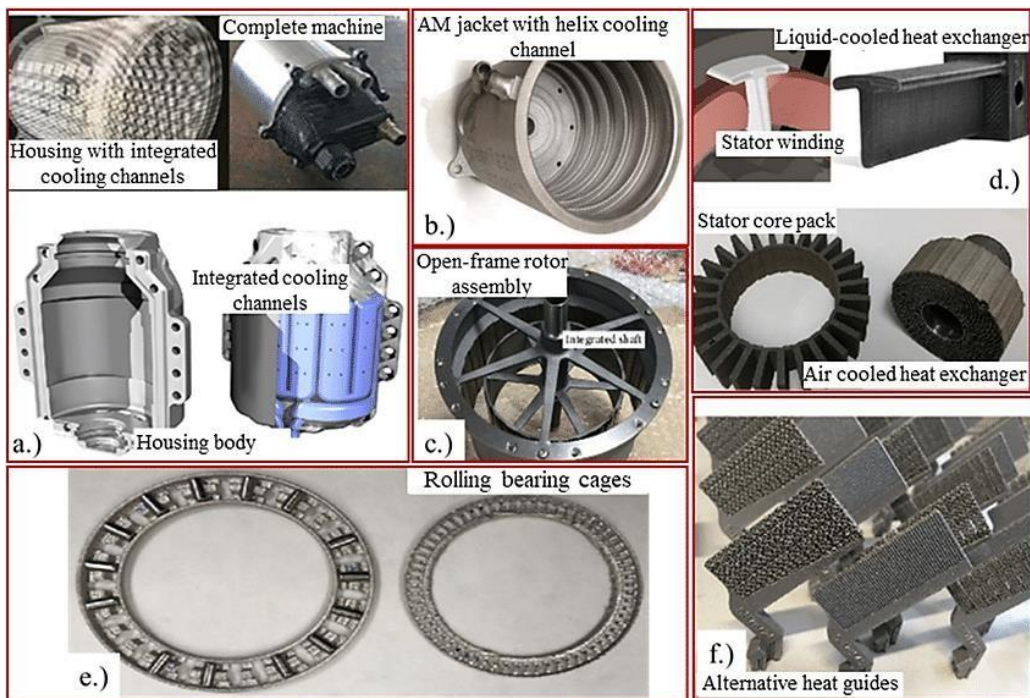


Figura 3.19 Parti di una macchina elettrica costruite tramite AM: a), b), d) componenti di raffreddamento a liquido integrato c) componenti di rotore e statore raffreddati ad aria e) gabbie dei cuscinetti f) scambiatori di calore.

Come si può evincere dal capitolo “Mechanical behavior of additive manufactured, power-bed laser fused materials” tratto dal libro “Materials Science & Engineering”, le ricerche e lo sviluppo in questo campo dell’AM sono ad uno stadio piuttosto avanzato rispetto alle tecniche di produzione convenzionali. Sempre più ricercatori stanno adottando approcci per la realizzazione di una macchina elettrica costruita interamente con le tecniche AM portando ad un miglioramento dell’efficienza.

Un esempio particolare lo si può osservare dall’estratto “Spray-Formed Hybrid-Field Electric Motor” della conferenza del 2016 a Vancouver tratto da “ASME Design Engineering Technical Conference”<sup>15</sup>. Qui si è presentato un prototipo di un avanzato design di un motore elettrico per il settore Automotive. Il modello teorico ha mostrato un’efficienza di circa il 90% in un’ampia regione operativa nel grafico delle caratteristiche coppia-velocità. Questo rappresenta un valore molto alto rispetto ai motori adibiti alla trazione attualmente in commercio (Figura 3.20).

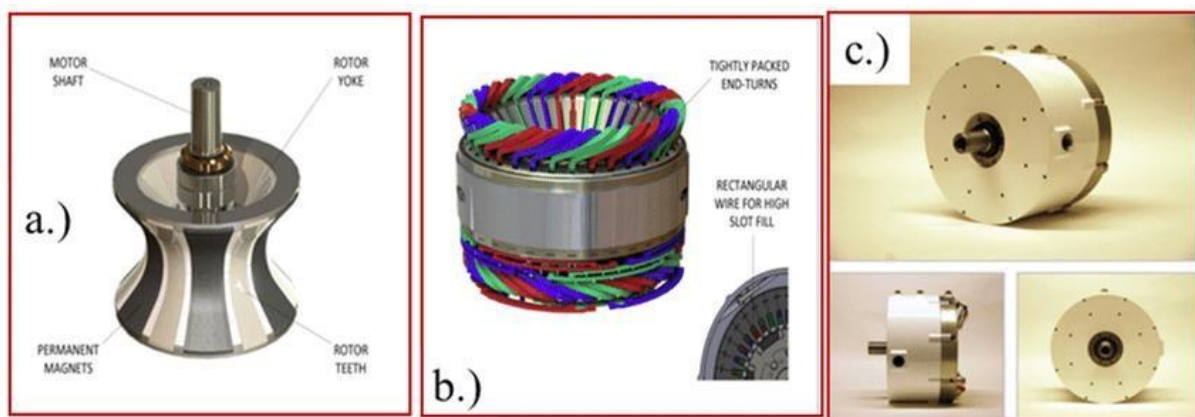


Figura 3.20 Motore di trazione ibrido a) rotore b) statore con raffreddamento integrato c) motore parzialmente assemblato.

<sup>15</sup> <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-abstract/IDETC-CIE2016/50138/V003T01A034/257044>

### 3.5 AM nel design di monitoraggio termico

Il monitoraggio termico per una macchina elettrica risulta di fondamentale importanza per l'affidabilità e la longevità della stessa macchina elettrica. Scegliere il giusto e migliore sistema di raffreddamento è risultato sempre più fondamentale per il raggiungimento di una migliore estrazione di calore e una riduzione della temperatura dei parametri chiave della macchina. Esistono due metodi principali per il monitoraggio termico e sotto-metodi usati nelle macchine elettriche (Figura 3.21).

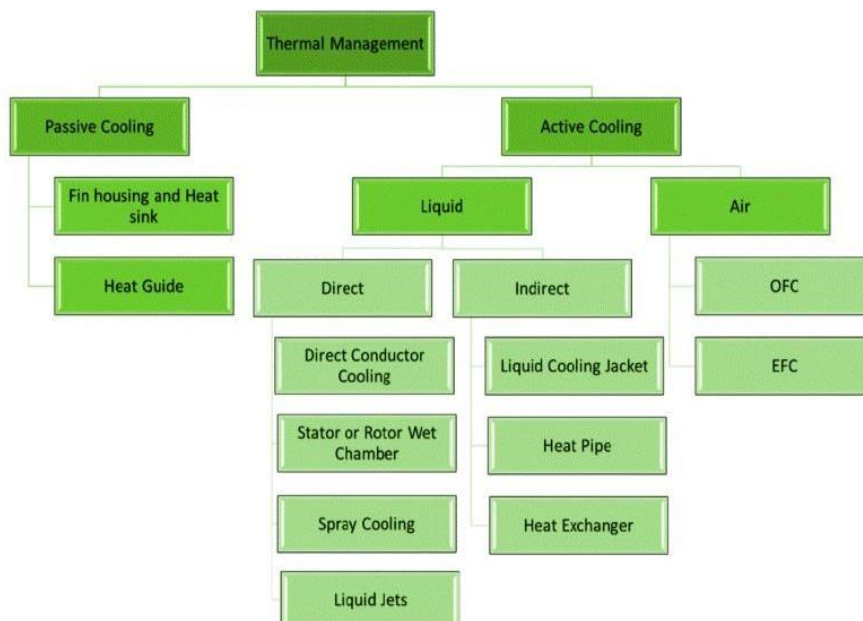


Figura 3.21 Vari metodi di monitoraggio termico per macchine elettriche.

I raffreddamenti passivi offrono un'affidabilità migliore e una soluzione tutto sommato poco costosa mentre i raffreddamenti attivi mostrano una migliore capacità di raffreddamento.

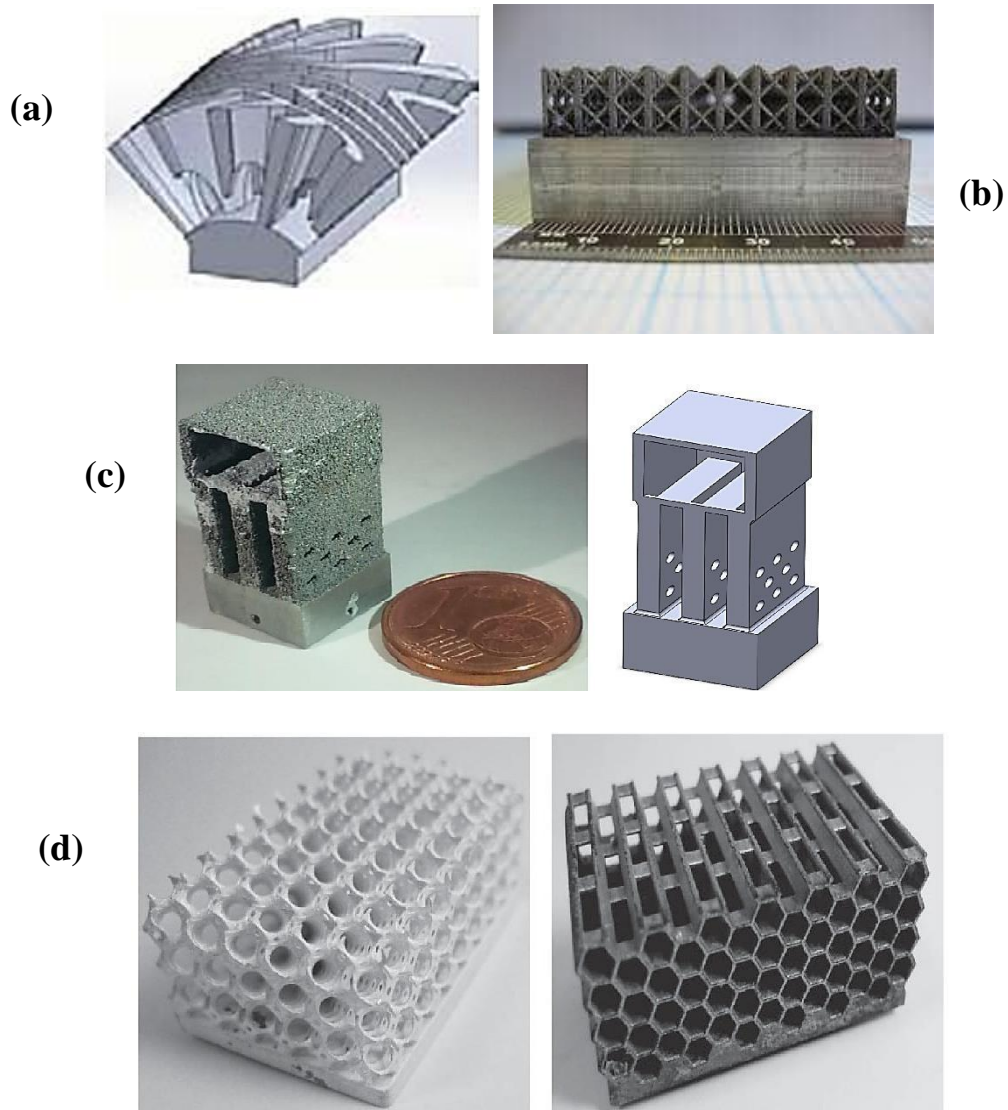
Additive Manufacturing ha permesso di migliorare la capacità di raffreddamento in molti modi quali l'ottimizzazione della forma e geometria del sistema di raffreddamento, la riduzione di peso, gli inconvenienti e i limiti legati ai processi di produzione convenzionali.

### 3.5.1 AM Heat Sink

L' *Heat Sink*, noto come dissipatore di calore, rappresenta uno dei principali metodi di gestione termica per impianti elettrici e dispositivi elettronici al fine di portare il calore da questi dispositivi all'aria. Il dissipatore di calore sfrutta il raffreddamento ad aria e rappresenta un ottimo metodo per avere un design semplice, affidabile e poco costoso. Per questo tipo di raffreddamento, è possibile, attraverso l'aumento dell'HTC (Heat Transfer Coefficient), ovvero il coefficiente di scambio termico, e alzando l'area superficiale in contatto con l'aria, migliorare l'estrazione di calore dal dispositivo considerato. Un aumento può avvenire a seguito di una maggiore portata d'aria e una riduzione del diametro. Il diametro ridotto causa maggiori resistenze di flusso nel dissipatore e di conseguenza serve più energia elettrica per azionare la ventola. Invece, aumentando la portata d'aria si arriva ad avere un consumo di potenza del ventilatore, rumore acustico e una maggiore caduta di pressione. A causa di queste problematiche appena esposte risulta che, per far aumentare l'estrazione di calore, questi modi non sono i migliori da applicare. Di conseguenza l'unico modo è quello di realizzare un dissipatore di calore con un'area maggiore.

Per la produzione di dissipatori di calore attivi e passivi si sta prendendo sempre più in considerazione l'Additive Manufacturing. Di seguito vengono proposti vari esempi di dissipatori di calore con forme e strutture complesse realizzate mediante AM (Figura 3.22).





*Figura 3.22 Dissipatori di calore costruiti mediante AM a) dissipatore di calore con struttura a forma di corallo b) dissipatore di calore con struttura reticolare c) dissipatore di calore con effetto tubo di Pitot d) dissipatore di calore con struttura a nido d'ape.*

In base al tipo di applicazione, possiamo scegliere il giusto design per fabbricare il dissipatore di calore. Ad esempio, il modello a nido d'ape risulta la scelta migliore per applicazioni con caduta di pressione minima.

### 3.5.2 AM Heat Exchangers

Gli *Heat Exchangers (HE)*, noti come scambiatori di calori, sono dispositivi che trasferiscono il calore da un fluido ad un altro fluido in maniera continuativa. Risultano particolarmente importanti nel settore Automotive con motori elettrici che richiedono alta densità di coppia dove la maggior parte delle perdite si concentra negli avvolgimenti e nelle fessure di statore.

Con le tecniche dell'AM si ha la possibilità di implementare design più dettagliati, forme complesse e scambiatori di calore monolitici riducendo le componenti in uso. Può essere effettuata una divisione degli HE attivi basati sul raffreddamento a fluido in due gruppi principali:

- HE raffreddati a liquido.
- HE raffreddati ad aria.

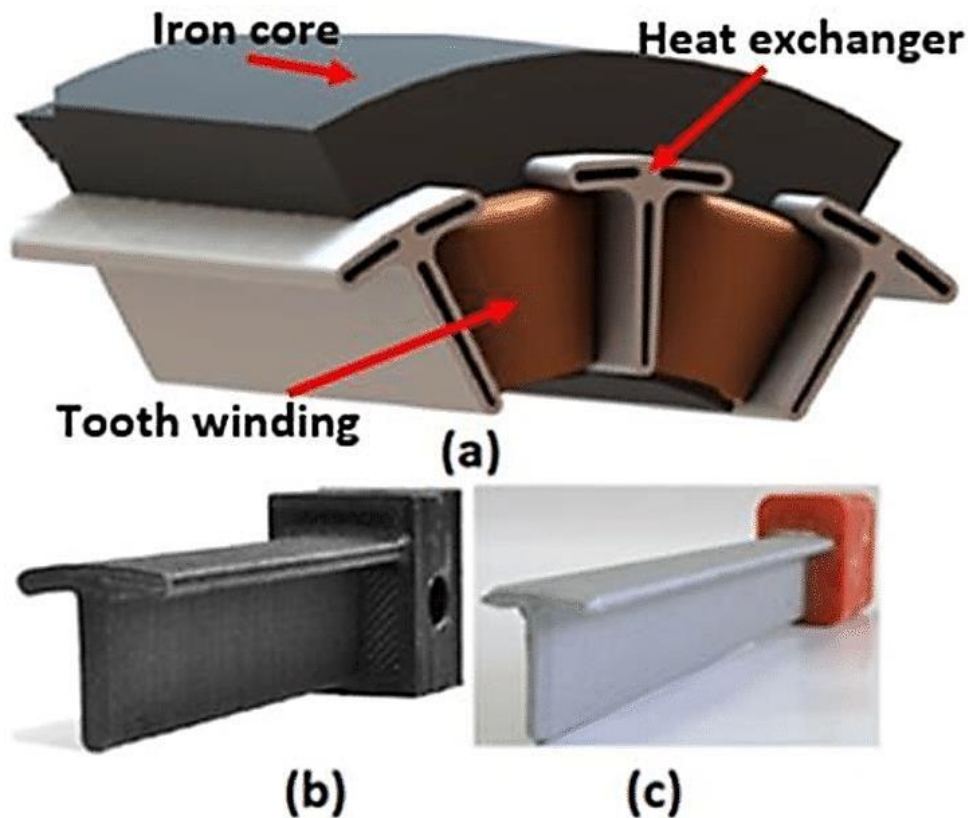
Gli scambiatori di calore raffreddati a liquido si presentano come una valida alternativa al raffreddamento ad olio utilizzato nei motori per la riduzione in termini di peso, costi e complessità. Questa tecnologia sfrutta una miscela di acqua glicolata come liquido di raffreddamento portando vantaggi come migliori prestazioni e proprietà termiche, minori perdite di pompaggio e trasferimento di calore anche ad alte temperature.

Un esempio può essere osservato nell'articolo "Cooling of windings in electric machines via 3-D printed heat exchangers" tratto da "*IEEE Transactions on Industry Applications*<sup>16</sup>" dove viene esposto il modello 3D di un DWHX (direct winding heat exchange) con struttura dielettrica. Grazie ai materiali dielettrici e alle tecniche AM, si è giunti ad un miglioramento delle prestazioni termiche realizzando geometrie di flusso più complesse e aggiungendo una caratteristica di flusso interno nei HE a forma di T eliminando lo spazio tra le fessure di statore. I vari prototipi si differenziano per l'utilizzo dei vari materiali dielettrici. Dagli studi emerge che l'utilizzo come materiale di PC-Al per la realizzazione di un prototipo DWHX risulta la migliore scelta per quanto riguarda le prestazioni (Figura 3.23).

---

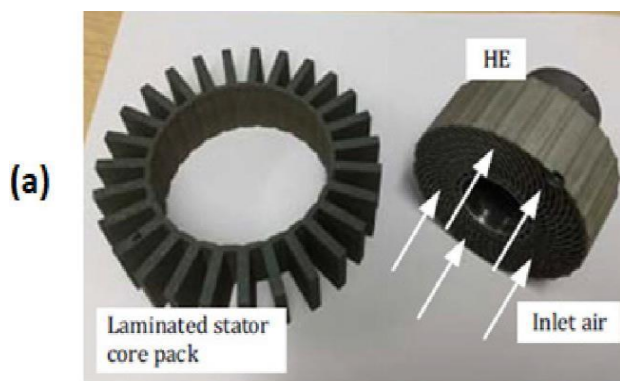
<sup>16</sup> <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=28>



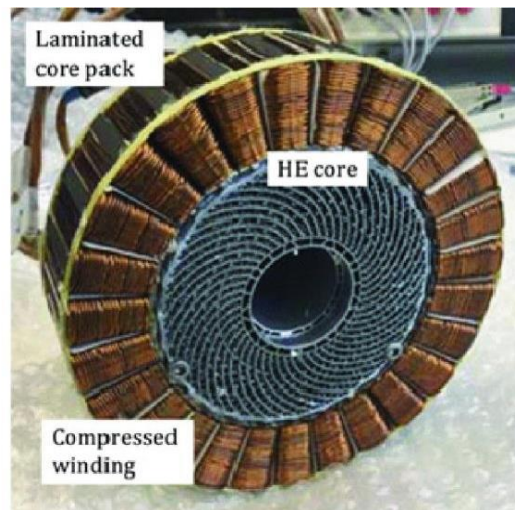


*Figura 3.23 Concept di un 3D-DWHX a) design realizzato mediante CAD di statore e avvolgimenti con HE a forma di T b) prototipo DWHX con CF-Nylon come materiale c) prototipo DWHX con PC-Al come materiale.*

Gli scambiatori di calore raffreddati ad aria trovano applicazione per aerei solari senza equipaggiamento. Questi aerei sono stati progettati per voli di lunga durata, devono essere leggeri, compatti e presentano due fasi di operazione: una di decollo che necessita di una coppia elevata e una fase continua con prestazioni ad alta efficienza. Nella fase di decollo abbiamo la maggior parte delle perdite in termini di potenza; risulta quindi necessario utilizzare il giusto metodo di gestione termica per estrarre il calore dal motore. Di seguito è possibile osservare un esempio di uno scambiatore di calore scelto per estrarre il calore di un aereo solare (Figura 3.24).



(b)



*Figura 3.24 a) prototipo di nucleo di statore laminato e HE realizzato da Newcastle University b) assemblaggio di statore e avvolgimenti con HE integrato.*

### 3.5.3 AM Heat Pipe

*Heat Pipe (HP)*, o tubo di calore, è un dispositivo in grado di trasferire calore da una sorgente a temperatura maggiore ad una con temperatura minore senza richiedere energia dall'esterno. Il principio di funzionamento di questo dispositivo si basa su due fasi semplici sfruttando il ciclo di evaporazione e condensazione del fluido di lavoro eliminando il calore da una parte all'altra.

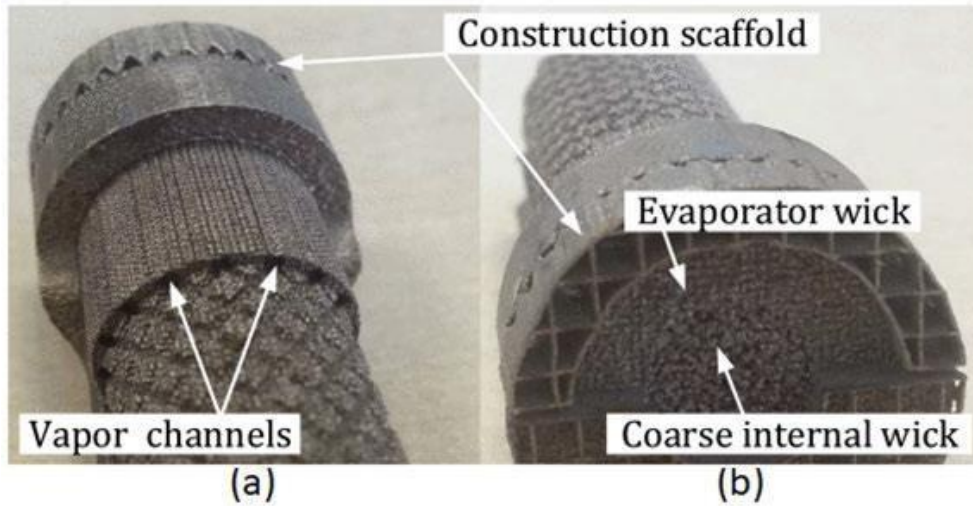
La scelta del materiale e del liquido di lavoro caratterizzano la temperatura di funzionamento del HP. Risulta quindi di fondamentale importanza perché soprattutto per l'affidabilità e la capacità di trasferimento di calore<sup>17</sup> (Tabella 3.2).

Fluido di lavoro (HP)	Materiale involucro (HP)	Range di temperatura(°C)
Anidride carbonica	alluminio, acciaio inox, titanio	Da -50 a 30
Azoto	acciaio inox	Da -200 a -160
Elio	acciaio inox, titanio	Da -271 a -269
Acetone	alluminio, acciaio inox	Da -48 a 125
Ammoniaca	alluminio, acciaio inox	Da -75 a 125
Acqua	rame, monel, nichel, titanio	Da 1 a 325
Cesio	acciaio inox, inconel, haynes	Da 350 a 925
Sodio	acciaio inox, inconel, haynes	Da 500 a 1225
Argento	tungsteno, molibdeno	Da 1625 a 2025

Tabella 3.2 Materiali convenzionali e fluidi di lavoro di HP.

<sup>17</sup> <https://it.boydcorp.com/resources/temperature-control/heat-pipe-technology.html#:~:text=Il%20fluido%20pi%C3%B9%20comune%20C3%A8,873%2D1%2C473%C2%B0K>

Tuttavia con l'utilizzo delle tecniche dell'AM si ha la possibilità di costruire strutture geometriche complesse di HP introducendo l'uso di nuovi materiali come polimeri, ceramiche e leghe metalliche. Esempi di HP realizzati mediante AM vengono proposti di seguito (Figura 3.25).



*Figura 3.25 Prototipi HP stampati tramite metodo SLM a) Sintered wick shape b) Gooved wick shape.*

### 3.5.4 AM Indirect Liquid Jacket

*Liquid cooling jacket* è un sistema di raffreddamento consistente in un involucro attorno alla circonferenza esterna dello statore che rappresenta una forma primaria di monitoraggio termico per una macchina elettrica.

Tramite le tecniche fornite dall'Additive Manufacturing è possibile realizzare questo tipo di sistema in un unico blocco. Inoltre risulta facilmente collocabile nel posto appropriato grazie alla riduzione in termini di costo, tempi di produzione, peso, numero totale delle parti utilizzate e possibile fuoriuscita di liquido.

Trovano rilievo applicazioni EV per il settore Automotive (Figura 3.26).



*Figura 3.26 Due concept di Liquid Cooling Jacket integrati e costruiti tramite AM per motore delle macchine da corsa a) prototipo realizzato dalla TU Fast Racing Team b) prototipo realizzato da Greenteam Stuttgart.*

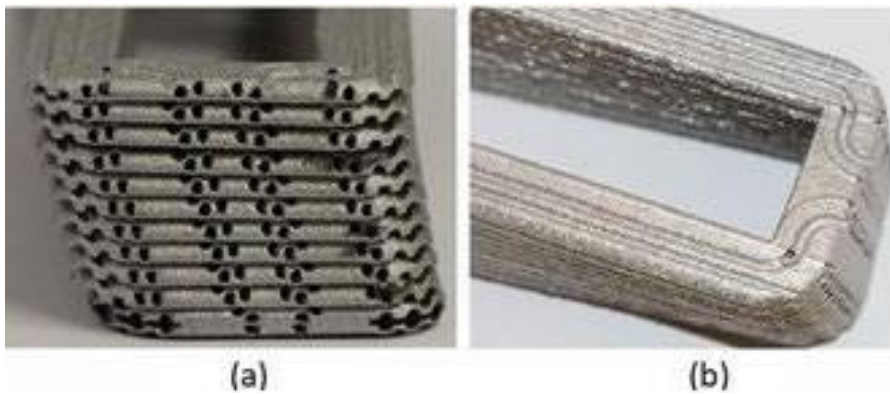
Il concept realizzato da TU Fast Racing Team<sup>18</sup> tramite le tecniche AM si caratterizza per una struttura integrato che consiste in un canale di Liquid Cooling Jacket con una forma dei pin ottimizzata. Si stima un aumento del flusso di massa totale di circa il 31% e un'efficienza del sistema di raffreddamento di circa il 20%. Invece il concept realizzato da Greenteam Stuttgart<sup>19</sup> rappresenta una struttura più leggera con una riduzione in peso di circa il 16% e un'efficienza del sistema di raffreddamento di circa il 37%.

<sup>18</sup> <https://tufast-racingteam.de>

<sup>19</sup> <https://www.greenteam-stuttgart.de>

### 3.5.5 AM Direct Liquid Cooling Winding

*Direct Liquid Cooling Winding (DLC Windings)*, rappresenta uno dei metodi di gestione termica più efficienti per dissipare le perdite di calore dello statore. Viene deionizzata acqua o olio oltre i passaggi cavi delle barre per permettere la riduzione dell'alta temperatura negli avvolgimenti di statore. Varie implementazioni tramite tecniche AM possono essere osservate alla Figura (3.27).



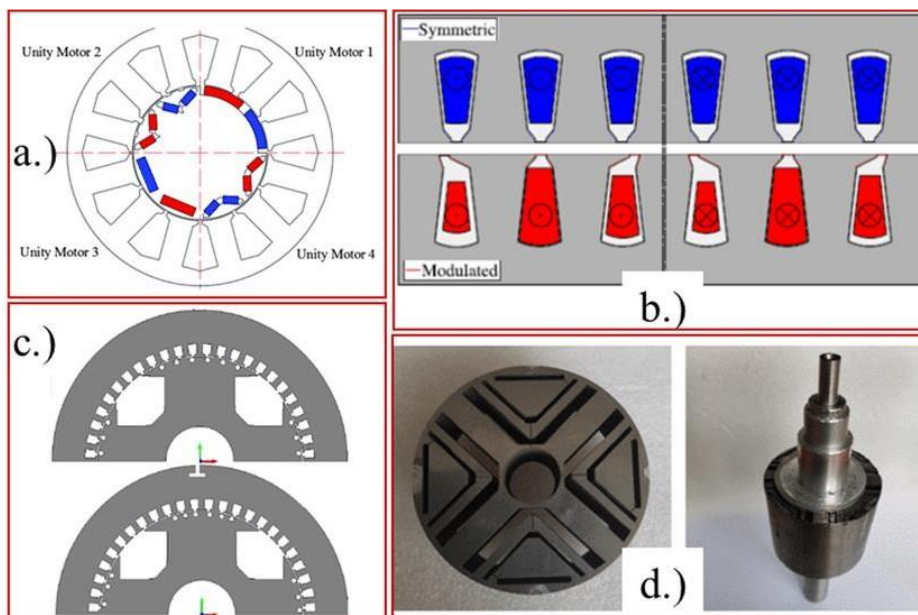
*Figura 3.27 Denti delle bobine in alluminio con passaggi di raffreddamento integrati a) vista laterale del canale di raffreddamento b) vista dall'alto dei denti di bobine.*



## 4. PRODUZIONE DI UNA MACCHINA ELETTRICA COMPLETA

Allo stato attuale, la produzione attraverso tecniche AM è limitata alla realizzazione di singole parti di una macchina e poi assemblarle, mentre l'obiettivo sarebbe quello di riuscire a produrre tramite AM una macchina elettrica completa.

A livello di design, la simmetria impone dei limiti nell'esprimere il potenziale completo delle macchine elettriche. Con l'avvento dell'AM, i ricercatori si sono sempre più concentrati sullo studio di design alternativi asimmetrici per macchine non convenzionali (Figura 4.1). I design realizzati con asimmetria permettono di ottenere delle caratteristiche vantaggiose come, ad esempio, riduzione del ripple di coppia e della coppia di cogging, incremento della coppia e dell'efficienza (Tabella 4.1).



*Figura 4.1 a) asimmetria unity-motor nel rotore b) asimmetria slot-opening per un motore a induzione c) asimmetria damper-cage per un generatore sincrono d) asimmetria della disposizione dei magneti nel rotore per un motore HP-IPM.*



Tipo di asimmetria	Tipo di macchina	Parametri prestazionali di interesse	Miglioramenti dei parametri prestazionali
Asimmetria Unity-motor	Motore PM	Ripple di coppia Coppia di cogging Controllo senza sensori	Riduzione 39.8% Riduzione 56.6% Riduzione dell'errore di posizione 81.1%
Asimmetria Slot-opening	Motore a induzione	Ripple di coppia	Riduzione 63%
Asimmetria damper cage	Generatore sincrono	Distorsione armonica totale	Miglioramento 54%
Asimmetria flux-barriers	Macchina a riluttanza sincrona	Coppia Fattore di potenza Efficienza	Aumento 9.6% Aumento 22.4% Aumento 2.3%
Asimmetria nella disposizione dei magneti	Macchina HP-IPM	Ripple di coppia Coppia	Riduzione 40.9% Aumento 28.9%

*Tabella 4.1 L'asimmetria nel design delle macchine con corrispondenti benefici.*

Risulta quindi evidente l'importanza che offre l'asimmetria di design nelle prestazioni di una macchina elettrica. Grazie all'introduzione dell'AM, si è ottenuta una maggiore flessibilità a livello di design e la possibilità di realizzare macchine che richiedono specifiche caratteristiche come piccole dimensioni, compattezza, applicazioni specifiche e un'alta densità di energia.

In base al tipo di applicazione, costruzione delle singole parti e delle caratteristiche prestazionali si possono avere vari tipi di macchine elettriche implementabili con l'utilizzo dell'AM. Ecco alcuni tipi di macchine:

- Switched Reluctance Machine (SRM)
- Synchronous Reluctance Machine (SynRM)
- Claw-Pole Machine (CPM)
- Hysteresis Motor

## 4.1 Switched Reluctance Machine (SRM)

Switched Reluctance Machine (SRM) offrono caratteristiche interessanti in termini di coppia elevata e una vasta gamma di velocità operative. Controllando la sequenza di commutazione in accordo con un design elettromagnetico appropriato, le caratteristiche di coppia e velocità possono essere adattate per l'utilizzo nel settore dell'industria automobilistica. Inoltre, andando a modificare la selezione dei parametri di controllo con coppia e velocità, possono essere offerte caratteristiche diverse per la definizione di un determinato design di una macchina (Figura 4.2).

AM inoltre, consente l'applicazione di Topology Optimization per quanto riguarda il design della macchina permettendo, con l'aggiunta di una fase successiva di analisi, di raggiungere varie ottimizzazioni come un'alta coppia media e un basso ripple di coppia con poca massa. Tuttavia, sono presenti alcuni problemi come il complesso schema di controllo dovuto alla variazione dei parametri, al rumore e alle vibrazioni.

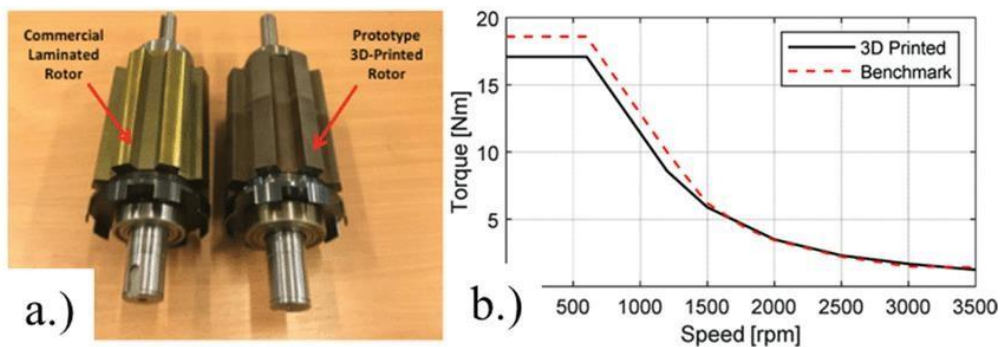


Figura 4.2 a) Confronto tra un rotore laminato commerciale (standard di riferimento) e un rotore di una SRM costruito tramite le tecniche AM b) caratteristica coppia-velocità dello standard di riferimento e il rotore costruito tramite tecniche AM.

## 4.2 Synchronous Reluctance Machine (SynRM)

Synchronous Reluctance Machine (SynRM) ha il vantaggio di essere a livello di costruzione semplice e presenta un basso momento inerziale del rotore che consente di avere una risposta veloce e densità di coppia alta. Tuttavia questo tipo di macchina presenta un funzionamento a velocità costante il cui controllo può essere ottenuto mediante l'utilizzo di uno schema di controllo della frequenza. Questi tipi di macchine trovano principalmente impiego in dispositivi di dosaggio, industrie per la produzione di fibre sintetiche, macchine per imballaggi e piegatrici,

per il posizionamento delle barre di controllo in industrie nucleari e nei sistemi industriali che richiedono determinati processi continui e sincronizzati.

Da un punto di vista dell'AM, il rotore di una SynRM ha 3 topologie di base: polo saliente (SP), anisotropia laminata assialmente (ALA) e anisotropia laminata trasversalmente (TLA) con l'ALA avente massimo fattore di potenza di 0.8. La struttura geometrica dell'ALA risulta complessa e difficile da realizzare mediante le tecniche di produzione convenzionali. Di conseguenza grazie alle tecniche AM è possibile realizzare con facilità il rotore di una SynRM proponendo nuovi design (Figura 4.3).

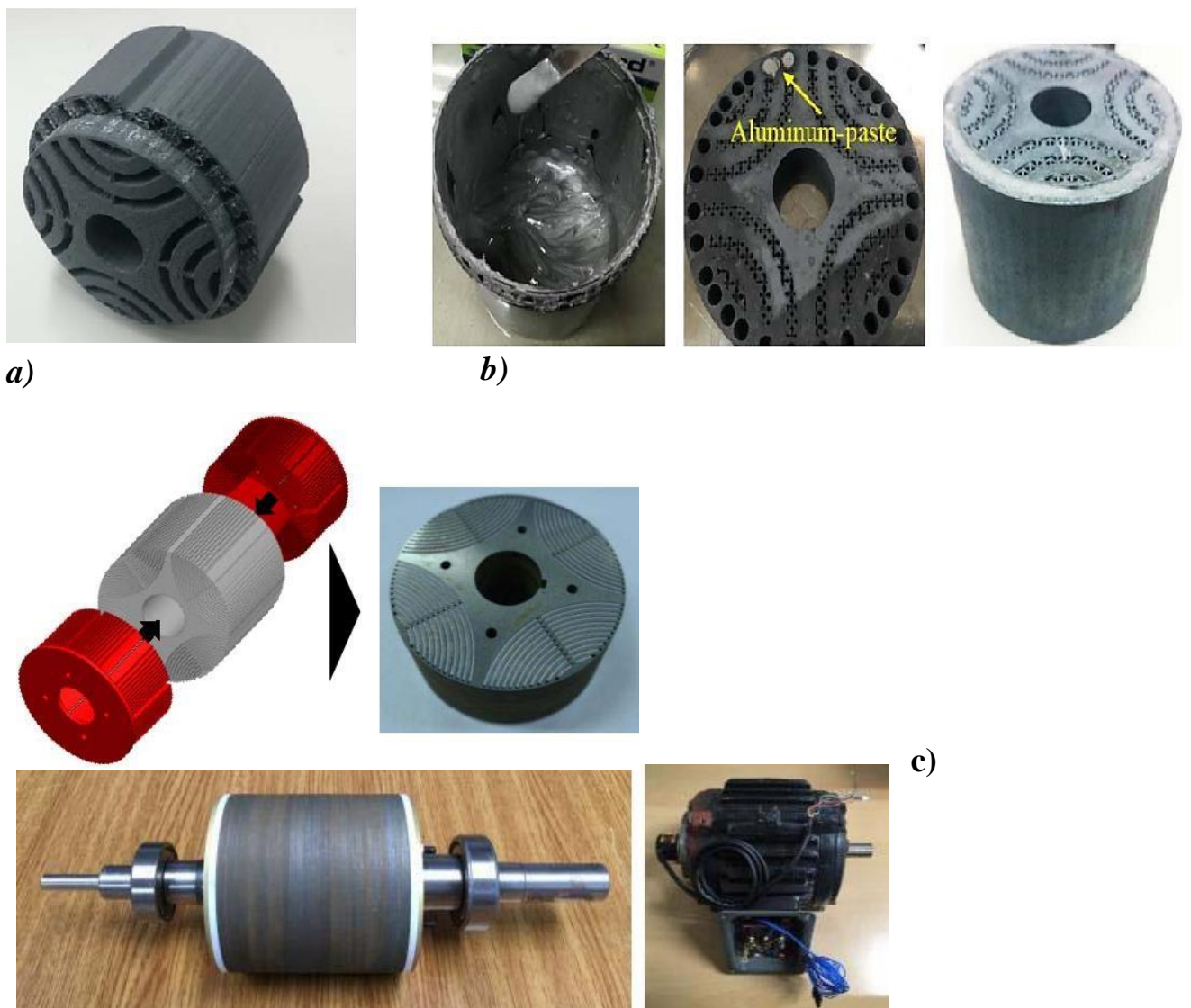
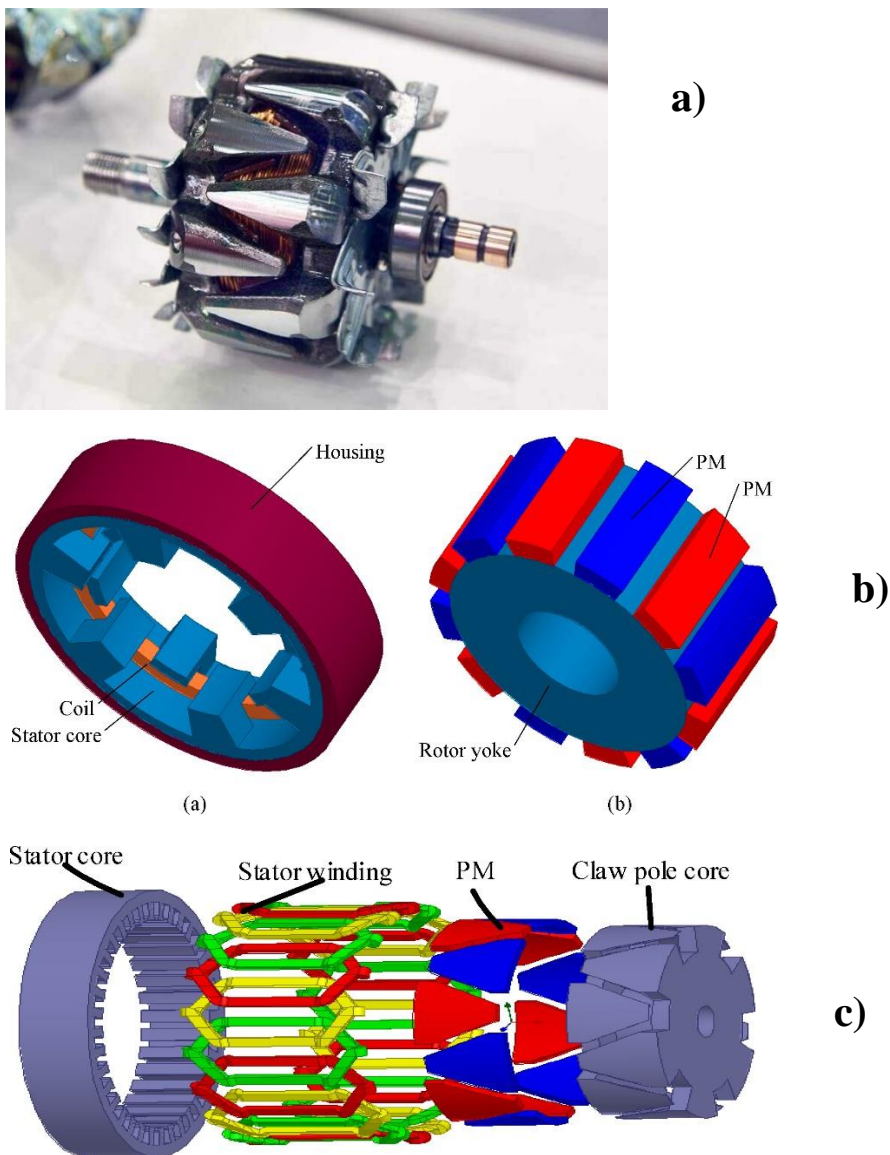


Figura 4.3 Rotori costruiti tramite tecniche AM per SynRM a) prototipo realizzato tramite stampaggio 3D b) prototipo Line Start-SynRM (LS-SynRM) c) progettazione del prototipo del rotore, rotore assemblato e SynRM.

### 4.3 Claw-Pole Machine (CPM)

Claw-pole Machines (CPM) forniscono una densità di coppia fino a tre volte superiore rispetto alle macchine convenzionali. La maggior densità di coppia, permette alla CPM di essere impiegata in un'ampia gamma di applicazioni che necessitano di compattezza dimensionale come ad esempio alternatori di automobili e elettrodomestici di medie dimensioni. Il design delle macchine CPM risulta complesso e non facilmente realizzabile utilizzando la laminazione tradizionale, mentre con l'uso delle tecniche AM ne facilita la produzione (Figura 4.4). Per quanto riguarda la fabbricazione, i Soft Magnetic Composites (SMC) sono risultati i più vantaggiosi.



*Figura 4.4 Esempi di macchine CPM a) Raffigurazione di una macchina CPM b) statore e rotore di una macchina CPM c) Rappresentazione di tutte le componenti principali per la realizzazione di una macchina CPM.*

## 4.4 Hysteresis Motor

Hysteresis Motor è essenzialmente un motore sincrono senza eccitazione in corrente continua. La produzione di coppia avviene mediante interazione del flusso di statore con il flusso dovuto alle perdite per isteresi. Poiché il suo funzionamento è principalmente basato sulle perdite di isteresi, il suo fattore di potenza e il rapporto coppia/volume sono bassi. Tuttavia, queste macchine sono utili in applicazioni a bassa potenza in cui velocità costante e bassa ondulazione di coppia sono le principali caratteristiche richieste come apparecchiature di precisione, orologi, dischi rigidi e giroscopi. Lo statore è di costruzione scanalata per poter alloggiare avvolgimenti che producono flusso rotante, mentre il rotore è realizzato di materiale magnetico duro (Figura 4.5).

I motori a isteresi presentano uno scenario di utilizzo promettente, rispetto ad altre macchine elettriche con PM sinterizzati o configurazioni di fogli laminati. Ciò si deve a una serie di fattori, come ad esempio: la resistenza meccanica che limita la velocità massima raggiungibile, il rotore solido del motore a isteresi che fornisce un'elevata rigidità durante le transizioni di velocità critiche, Comportamento termico dei motori a induzione convenzionali, dove correnti parassite causano il surriscaldamento del rotore e nel caso di motori sincroni PM, il surriscaldamento può causare smagnetizzazione e la capacità del motore di isteresi di migliorare le sue prestazioni di coppia grazie alla magnetizzazione di rotore .

# HYSTERESIS MOTOR



Figura 4.5 Rappresentazione delle parti che vanno a costituire il motore a isteresi.

## 5. ESEMPIO DI APPLICAZIONE: SETTORE AUTOMOTIVE

Il settore Automotive tradizionalmente risulta improntato per produzione in volumi medio-alti. L'utilizzo della tecnologia AM a livello industriale è ancora limitato rispetto ad altri settori come quello aerospaziale o biomedicale. Questa tendenza però è destinata a cambiare viste le grandi opportunità offerte dai continui sviluppi nel campo delle nuove tecniche di stampa 3D. Le tecniche dell'AM, a livello industriale, mostrano varie opportunità come:

- Stampi pre-serie: vista l'importanza nel design per il settore automotive, grazie all'AM è possibile realizzare un numero elevato di prototipi di design in tempi brevi e costi ridotti.
- Personalizzazioni: viste le continue richieste da parte dei clienti di personalizzazioni nelle automobili di componenti come cruscotti, pannelli personalizzati, compartimenti e altro, l'AM permette di abbattere i tempi di produzione e ridurre i costi.
- Componenti per test: tramite l'additive manufacturing, le aziende del settore automotive possono utilizzare materiali con elevate prestazioni per la realizzazione di componenti adatti ai test funzionali.

Sempre più case automobilistiche stanno investendo sull'inserimento della stampante 3D nei processi di produzione portando un risparmio in termini di tempo e uno sfruttamento migliore delle materie prime. Tra queste troviamo ad esempio Ferrari, Lamborghini, Volkswagen, Ford, Audi e Bmw, solo per citarne alcune. Al momento l'utilizzo dell'AM per la produzione industriale nel settore automobilistico è riservato alla realizzazione di singole parti in metallo. L'intenzione sarebbe quello di arrivare ad una produzione su larga scala con costi di fabbricazione contenuti. Oltre all'ambito di produzione industriale automobilistico, l'AM sta riscontrando molto interesse per quanto riguarda le riparazioni, in particolare nella realizzazione mediante scanner 3D di componenti per auto d'epoca<sup>20</sup>. Vari progetti di ricerca si stanno concentrando in particolare sullo sviluppo di nuovi motori elettrici senza l'utilizzo dei materiali delle terre rare per la realizzazione dei magneti permanenti. Tra tutti troviamo REFREE Drive<sup>21</sup>, progetto di ricerca nato in Europa per la fabbricazione di motori elettrici senza terre rare per i magneti. L'intento di REFREE Drive è quello di arrivare ad avere una produzione di massa puntando sulla riduzione dei costi della produzione.

---

<sup>20</sup> <https://www.igus.it/info/3d-print-classic-car-spareparts>

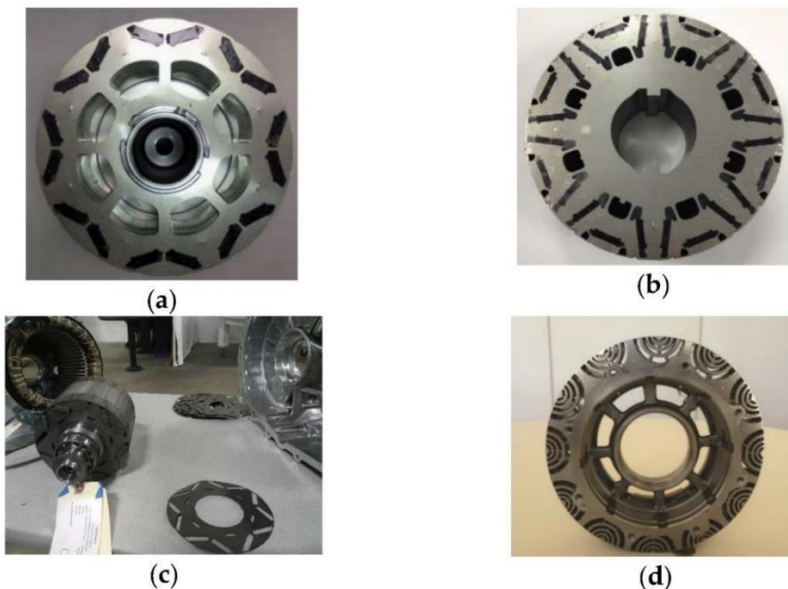
<sup>21</sup> <http://www.refreedrive.eu>



## 5.1 IPM motor

Il motore IPM (Interior Permanent Magnets) è un motore sincrono a corrente alternata con i magneti permanenti, realizzati con i materiali delle terre rare, inseriti all'interno del rotore. Quest'ultimo è costituito da una pila di lamierini metallici stampati con scanalature in modo tale da formare una cavità parallela all'asse del motore. All'interno di queste cavità vengono inseriti i magneti permanenti formando un allineamento preciso senza l'uso di attrezzature speciali e mantenendo nelle fessure i magneti anche in presenza di urti, vibrazioni. Ad oggi rappresenta il principale motore per la modalità ibrida ed elettrica. Tutto ciò è dovuto alle caratteristiche prestazionali elevate che presenta in condizioni di alta densità di coppia, elevata efficienza su un'ampia gamma di velocità di funzionamento ed elevata capacità di sovraccarico temporaneo. La produzione di coppia per un motore IPM avviene attraverso due meccanismi: il primo rappresenta la coppia a magneti permanenti generata grazie al collegamento di flusso tra il campo elettromagnetico del rotore e il campo dello statore; il secondo rappresenta la coppia di riluttanza. Le bobine di statore vengono eccitate in sequenza creando una serie rotante di poli magnetici nord/sud alternati. Di conseguenza il rotore seguirà questa serie rotante di poli andando a generare una coppia di riluttanza.

Si possono osservare esempi di design del rotore di motori IPM adatti alla trazione elettrica e ibrida (Figura 5.1).



*Figura 5.1 Esempi di design di rotore per motori IPM nella produzione di motori a trazione a) rotore V-shape di una Toyota Prius del 2010 b) rotore a doppia U di una Toyota Prius del 2017 c) rotore V-shape di una Tesla model 3 del 2017 d) rotore di una Chevy Volt del 2016.*

Ciò che consente ai motori IPM di essere molto vantaggiosi per applicazioni come motori di trazioni sono le prestazioni ad alta velocità. I principali vantaggi dell'utilizzo di un motore IPM per la trazione elettrica sono:

- Ridurre il rischio che un magnete venga staccato dalla forza centrifuga grazie all'allineamento preciso
- Coppia totale elevata data dai contributi della coppia magnetica e della coppia di riluttanza
- Gamma di velocità elevata grazie alla grande capacità di indebolimento del campo del motore IPM, tecnica che permette ai progettisti di applicare la corrente al fine di modificare le prestazioni e che implica la regolazione del campo magnetico di statore per limitare l'effetto dei magneti permanenti. Ad un continuo aumento della velocità corrisponde anche un aumento della tensione che, a causa della forza controelettrica, può superare la tensione della batteria, limitando la corrente di azionamento e la coppia.
- Ridurre il rischio di smagnetizzazione dei magneti permanenti
- Maggiore efficienza specialmente ad alta velocità viste le basse perdite di correnti parassite. Circa il 90% delle perdite del motore si verificano nello statore, che può essere raffreddato grazie a tecniche di dissipazione termica, raffreddamento ad olio o ad acqua.

Tuttavia il costo delle materie prime per la realizzazione dei magneti permanenti risulta molto elevato producendo un'incertezza a lungo termine vista la produzione in serie dei veicoli elettrici. Di conseguenza, stanno riscontrando molto interesse soluzioni alternative per la realizzazione di macchine senza l'utilizzo delle terre rare.



## 5.2 SynRM motor

Un'alternativa in fase di sviluppo di motori realizzati senza l'utilizzo dei materiali derivanti dalle terre rare per l'applicazione al settore Automotive è rappresentata dalla macchina sincrona a riluttanza con implementazioni in termini di design sviluppata dal progetto REFREE Drive. L'obiettivo di questo progetto è quello di arrivare ad ottenere, con lo sviluppo di nuovi tipi di motore, dei valori prestazioni quanto più simili a quelli appartenenti ai motori attualmente in commercio utilizzando, per la formazione dei magneti permanenti, i materiali delle terre rare.

I SynRM sono dei motori a riluttanza sincrona nei quali il rotore viene realizzato per imporre la minima riluttanza magnetica in una direzione e la più alta nella direzione perpendicolare. Il sistema di controllo ha la capacità di dirigere il campo magnetico dello stato. Questo con il rotore genera una coppia di riluttanza che permette di ruotare il rotore nella direzione a resistenza magnetica minima alla medesima frequenza del campo magnetico dello statore (Figura 5.2).

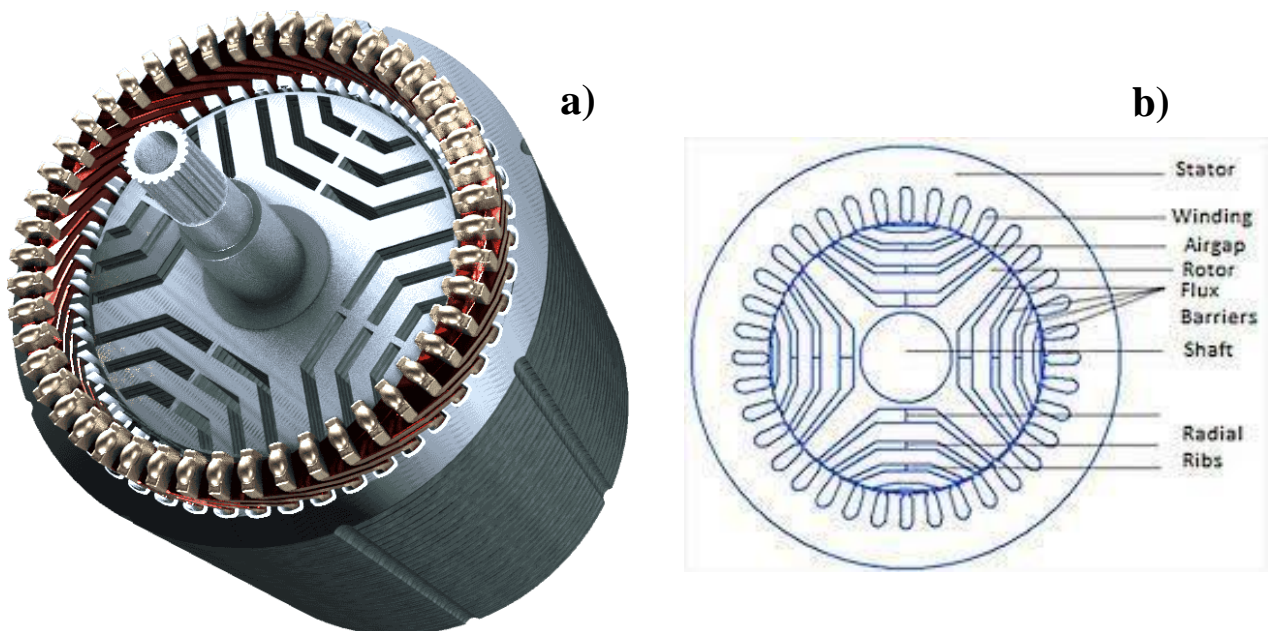


Figura 5.2 a) Rappresentazione di un motore SynRM b) Sezione trasversale di un motore SynRM.

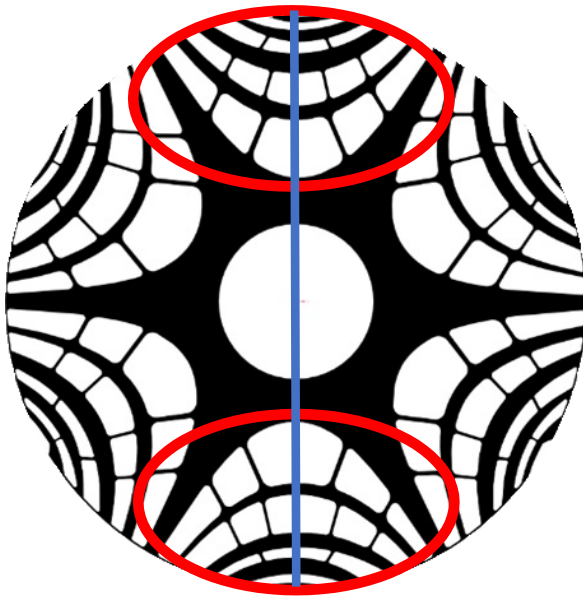
Tipo di motore	Vantaggi	Svantaggi
SynRM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il rotore dei motori SynRM è potenzialmente meno costoso dei motori PM perché non necessita dei costosi materiali delle terre rare</li> <li>• La coppia specifica è accettabile e non è influenzata dalla temperatura del rotore</li> <li>• Temperature degli avvolgimenti e dei cuscinetti più basse. Ciò porta ad una maggiore durata dell'isolamento e dei cuscinetti.</li> <li>• Semplice produzione</li> <li>• Basse perdite nel rotore anche ad alta velocità</li> <li>• Bassi valori d'inerzia e di massa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debole integrità strutturale del rotore ad alte velocità</li> <li>• Basso fattore di potenza</li> <li>• Basso rapporto peso/potenza</li> <li>• Complessità nel controllo</li> <li>• Bassa regione di indebolimento del flusso per alte velocità</li> </ul>

*Tabella 5.1 Vantaggi e svantaggi di un motore SynRM.*

Nonostante gli svantaggi presentati in Tabella 5.2, questi motori presentano un'alta densità di coppia e un'alta efficienza mediante un design del rotore ottimizzato. Inoltre, la potenza specifica in SynRM viene aumentata migliorando la velocità di funzionamento del rotore e la regione di indebolimento del flusso. Tuttavia, la geometria ottimale del motore deve essere perfezionata per garantire l'integrità meccanica del rotore ad alta velocità.

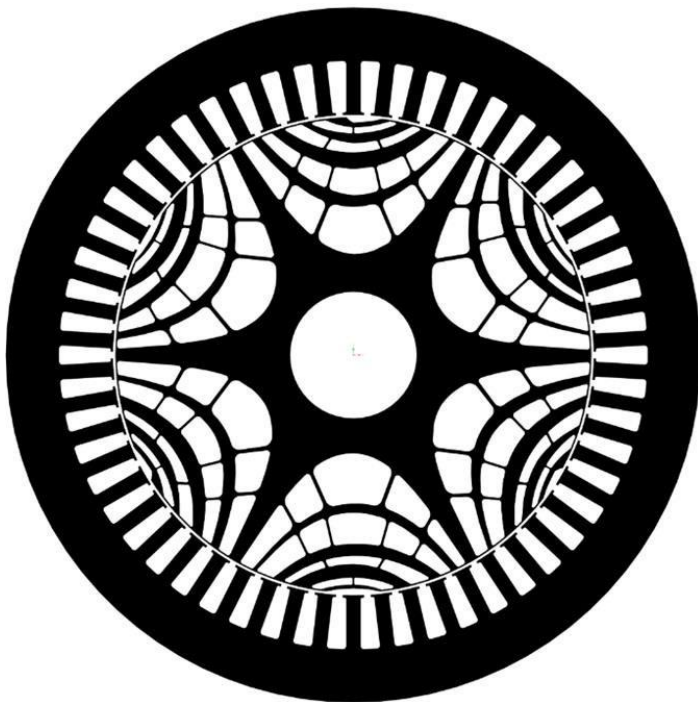
Un'ottimizzazione a livello di design del rotore per un motore SynRM viene proposto da REFREE Drive in collaborazione con il Gruppo di Ricerca del Dipartimento di Ingegneria ed Economia Industriale dell'Informazione dell'Università dell'Aquila<sup>22</sup>. La soluzione proposta mostra una struttura del rotore innovativa con nervature radiali e barriere “fluid shape”. Le nervature radiali e tangenziali sono state realizzate mediante Topology Optimization in modo da minimizzare il materiale sul rotore.

<sup>22</sup> <https://www.univaq.it/section.php?id=220>



*Figura 5.3 Sezione trasversale del rotore ottimizzato dal Gruppo di Ricerca del Dipartimento di Ingegneria ed Economia Industriale dell'Informazione dell'Università dell'Aquila per un motore SynRM a 6 poli.*

Il rotore mostra una forma asimmetrica con molteplici nervature che collegano i segmenti tra loro assialmente e trasversalmente; queste connessioni mantengono una sufficiente integrità meccanica nella struttura del rotore quando vengono applicate le forze di rotazione ad alta velocità.



*Figura 5.4 Design completo di statore e rotore per un motore SynRM ottimizzato.*

### 5.3 Confronto tra IPM e SynRM

A livello dei valori prestazionali ciò che si vuole ottenere per un motore SynRM è un avvicinamento, per quanto possibile, alle prestazioni di un motore IPM utilizzando le terre rare (Tabella 5.2).

<b>Modello</b>	Tesla Model 3	Toyota Prius	Toyota Prius	Bmw i3	/
<b>Anno</b>	2017	2010	2017	2016	/
<b>Tipo motore</b>	IPM	IPM	IPM	IPM	SynRM ottimizzato
<b>Massima velocità (RPM)</b>	18000	13500	17000	11400	18000
<b>Picco di potenza specifica (KW/Kg)</b>	3.3	1.6	1.7	3	5.3
<b>Picco di coppia (Nm)</b>	410	207	163	250	386
<b>Picco di efficienza (%)</b>	98	95	98	97	96.4
<b>Peso parti attive (Kg)</b>	68	38	32	42	46

Tabella 5.2 Confronto dei valori prestazionali tra i motori IPM e il motore SynRM ottimizzato.



## 6. CONCLUSIONI

Sulla base delle considerazioni fatte l'Additive Manufacturing sta coinvolgendo sempre più interesse viste le enormi potenzialità di applicazioni. È proprio questa vasta gamma di potenzialità che rendono l'AM per lo più una "terra" ancora inesplorata. Infatti, come mostrato nel Capitolo 2, le tecniche attualmente in uso per l'AM sono svariate e in continuo miglioramento. Attualmente la produzione additiva riguarda la realizzazione di singoli oggetti o singole parti di una macchina elettrica, ma la prospettiva futura è quella di arrivare a realizzare macchine elettriche complete riducendo i costi e aumentando la velocità di produzione. Il miglioramento di queste tecniche porterà sicuramente in futuro ad un impatto più significativo nelle performance aziendali visti anche gli investimenti sempre più consistenti nella tecnologia AM.

La possibilità per un'azienda di poter realizzare macchine elettriche tramite i nuovi materiali prodotti con le tecniche dell'AM permette di distaccarsi dalla necessità dei materiali delle terre rare che costituiscono ad oggi uno dei principali problemi a livello mondiale, basti pensare alla crisi dei chip. Infatti progetti come quello REFREE Drive stanno sfruttando al meglio le tecniche AM per realizzare motori elettrici per il settore Automotive senza l'uso degli elementi appartenenti alle terre rare con l'intento di ottenere valori prestazionali quanto più simili a quelli che si otterrebbero con motori elettrici a magneti permanenti realizzati tramite le terre rare. Questi progetti stanno mostrando una nuova possibile strada percorribile per tutti i tipi di settore distaccandosi dalla totale dipendenza della Cina per l'approvvigionamento dei costosi materiali delle terre rare.

## BIBLIOGRAFIA

1. Van Praet, K. Tips and Tricks for Metal 3D Printing: Recoaters. Available online: <https://www.materialise.com/en/blog/metal-3D-printing-recoaters> (accesso il 25 Giugno 2022).
2. Bambach, M. Metal Additive Manufacturing: Chapter 5: Laser-Based Metal Additive Manufacturing. Available online: <https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine> (accesso il 25 Giugno 2022).
3. Directed Energy Deposition—Synergy Additive Manufacturing. Available online: <https://synergyadditive.com/directed-energydeposition> (accesso il 25 Giugno 2022).
4. Taminger, K.M.B. Electron Beam Additive Manufacturing. Available online: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology> (accesso il 25 Giugno 2022).
5. Shokrollahi, H.; Janghorban, K. Soft magnetic composite materials (SMCs). *J. Mater. Process. Technol.* **2007**, 189, 1–12.
6. Tiismus, H.; Kallaste, A.; Belahcen, A.; Rassolkin, A.; Vaimann, T. Hysteresis Loss Evaluation of Additively Manufactured Soft Magnetic Core. In Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 23–26 August 2020; pp. 1657–1661.
7. Tiismus, H.; Kallaste, A.; Belahcen, A.; Vaimann, T.; Rassölkin, A.; Lukichev, D. Hysteresis Measurements and Numerical Losses Segregation of Additively Manufactured Silicon Steel for 3D Printing Electrical Machines. *Appl. Sci.* **2020**, 10, 6515.
8. Krings, A.; Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Sprague, S. Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2017**, 64, 2405–2414. doi:10.1109/TIE.2016.2613844.
9. Libert, F.; Soulard, J. Manufacturing Methods of Stator Cores with Concentrated Windings. In Proceedings of the 2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives—PEMD 2006, Dublin, Ireland, 4–6 April 2006; pp. 676–680.
10. Kustas, A.B.; Susan, D.F.; Johnson, K.L.; Whetten, S.R.; Rodriguez, M.A.; Dagel, D.J.; Michael, J.R.; Keicher, D.M.; Argibay, N. Characterization of the Fe-Co-1.5V

- soft ferromagnetic alloy processed by Laser Engineered Net Shaping (LENS). *Addit. Manuf.* **2018**, 21, 41–52. doi:10.1016/j.addma.2018.02.006.
11. Vacuumschmelze. *Soft Magnetic Materials and Semi-Finished Products*; Vacuumschmelze GMBH & Co. KG: Hanau, Germany. 2002.
  12. Zhang, B.; Fenineche, N.E.; Zhu, L.; Liao, H.; Coddet, C. Studies of magnetic properties of permalloy (Fe–30%Ni) prepared by SLM technology. *J. Magn. Magn. Mater.* **2012**, 324, 495–500. doi:10.1016/j.jmmm.2011.08.030.
  13. Garibaldi, M.; Ashcroft, I.; Hillier, N.; Harmon, S.; Hague, R. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe 6.9% wt Si soft magnets. *Mater. Charact.* **2018**, 143, 144–151. doi:10.1016/j.matchar.2018.01.016.
  14. Jhong, K.J.; Huang, W.C.; Lee, W.H. Microstructure and Magnetic Properties of Magnetic Material Fabricated by Selective Laser Melting. *Phys. Procedia* **2016**, 83, 818–824. Photonic Technologies Proceedings of the LANE 2016, Fürth, Germany, 19–22 September 2016. doi:10.1016/j.phpro.2016.08.084.
  15. Garibaldi, M.; Ashcroft, I.; Simonelli, M.; Hague, R. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting. *Acta Mater.* **2016**, 110, 207–216. doi:10.1016/j.actamat.2016.03.037.
  16. Pham, T.Q.; Do, T.T.; Kwon, P.; Foster, S.N. Additive Manufacturing of High Performance Ferromagnetic Materials. In Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 23–27 September 2018; pp. 4303–4308. doi:10.1109/ECCE.2018.8558245.
  17. Goll, D.; Schuller, D.; Martinek, G.; Kunert, T.; Schurr, J.; Sinz, C.; Schubert, T.; Bernthaler, T.; Riegel, H.; Schneider, G. Additive manufacturing of soft magnetic materials and components. *Addit. Manuf.* **2019**, 27, 428–439. doi:10.1016/j.addma.2019.02.021.
  18. Plotkowski, A.; Pries, J.; List, F.; Nandwana, P.; Stump, B.; Carver, K.; Dehoff, R. Influence of scan pattern and geometry on the microstructure and soft-magnetic performance of additively manufactured Fe-Si. *Addit. Manuf.* **2019**, 29, 100781. doi:10.1016/j.addma.2019.100781.
  19. Bozorth R (1993), *Ferromagnetism*. Hoboken, NJ, USA: Wiley. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Ferromagnetism-p-9780780310322>
  20. Valavi, M.; Nysveen, A.; Nilssen, R. Characterization of radial magnetic forces in low-speed permanent magnet wind generator with non-overlapping concentrated



- windings. In Proceedings of the 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2–5 September 2012; pp. 2943–2948.
21. Dyck, D.N.; Lowther, D.A. Automated design of magnetic devices by optimizing material distribution. *IEEE Trans. Magn.* **1996**, *32*, 1188–1193.
  22. Okamoto, Y.; Hoshino, R.; Wakao, S.; Tsuburaya, T. Improvement of Torque Characteristics For a Synchronous Reluctance Motor Using MMA-based Topology Optimization Method. *IEEE Trans. Magn.* **2018**, *54*, 1–4.
  23. Bendsoe, M.; Sigmund, O. *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*; Engineering Online Library; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003.
  24. Lee, J.; Dede, E.M.; Nomura, T. Simultaneous Design Optimization of Permanent Magnet, Coils, and Ferromagnetic Material in Actuators. *IEEE Trans. Magn.* **2011**, *47*, 4712–4716.
  25. Guo, F.; Salameh, M.; Krishnamurthy, M.; Brown, I.P. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **2020**, *56*, 3656–3667.
  26. Selema, A.; Ibrahim, M.N.; Sprangers, R.; Sergeant, P. Effect of Using Different Types of Magnet Wires on the AC Losses of Electrical Machine Windings. In Proceedings of the 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Hartford, CT, USA, 17–20 May 2021; pp. 1–5.
  27. Jagdale, V.; Tangudu, J. Topology Optimized End Winding for Additively Manufactured Induction Motor with Distributed Winding. Available online: <https://trid.trb.org/view/1835255> (accesso il 25 Giugno 2022).
  28. Vialva, T. Trumpf Introduces Precious Metal and Copper 3D Printing Powered by Green Laser. Available online: <https://3dprintingindustry.com/news/trumpf-introduces-precious-metal-and-copper-3d-printing-powered-by-green-laser-143689> (accesso il 26 Giugno 2022).
  29. Ranjan, R.; Tangudu, J. Thermal design of high power-density additively-manufactured induction motors. In Proceedings of the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, 14–18 September 2014; pp. 1325–1331.
  30. Wu, F.; EL-Refaie, A.M.; Al-Qarni, A. Additively Manufactured Hollow Conductors for High Specific Power Electrical Machines: Aluminum vs Copper. In Proceedings of

- the 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, 10–14 October 2021; pp. 4397–4404.
31. Simpson, N.; North, D.J.; Collins, S.M.; Mellor, P.H. Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **2020**, *56*, 2510–2519.
  32. Simpson, N.; Mellor, P.H. Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines. In Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 23–27 September 2018; pp. 5765–5772.
  33. Ayat, S.; Simpson, N.; Daguse, B.; Rudolph, J.; Lorenz, F.; Drury, D. Design of Shaped-Profile Electrical Machine Windings for Multi-Material Additive Manufacture. In Proceedings of the IEEE 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 23–26 August 2020; pp. 1554–1559.
  34. Additive Drives. Racing Engine with 3D-Printed Coils. Available online: <https://www.additive-drives.de/en/project/racingengine> (accesso on 26 Giugno 2022).
  35. Additive Drives. 3D-Printed Hairpin Windings for E-traction Motors. Available online: <https://www.additive-drives.de/en/project/e-traction-motor> (accesso il 26 Giugno 2022).
  36. Pham, T.; Kwon, P.; Foster, S. Additive Manufacturing and Topology Optimization of Magnetic Materials for Electrical Machines— A Review. *Energies* **2021**, *14*, 283.
  37. Urban, N.; Huber, F.; Franke, J. Influences of process parameters on rare earth magnets produced by laser beam melting. In Proceedings of the 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Wuerzburg, Germany, 5–6 December 2017; Volume 2017, pp. 1–5.
  38. Compton, B.G.; Kemp, J.W.; Novikov, T.V.; Pack, R.C.; Nlebedim, C.I.; Duty, C.E.; Rios, O.; Paranthaman, M.P. Direct-write 3D printing of NdFeB bonded magnets. *Mater. Manuf. Process.* **2018**, *33*, 109–113. doi:10.1080/10426914.2016.1221097.
  39. Lemke, J.; Simonelli, M.; Garibaldi, M.; Ashcroft, I.; Hague, R.; Vedani, M.; Wildman, R.; Tuck, C. Calorimetric study and microstructure analysis of the order-disorder phase transformation in silicon steel built by SLM. *J. Alloy. Compd.* **2017**, *722*, 293 – 301. doi:10.1016/j.jallcom.2017.06.085.
  40. Urban, N.; Huber, F.; Franke, J. Influences of process parameters on rare earth magnets produced by laser beam melting. In Proceedings of the 2017 7th International

- Electric Drives Production Conference (EDPC), Wuerzburg, Germany, 5–6 December 2017; pp. 1–5. doi:10.1109/EDPC.2017.8328149.
41. Paranthaman, M.P.; Shafer, C.S.; Elliott, A.M.; Siddel, D.H.; McGuire, M.A.; Springfield, R.M.; Martin, J.; Fredette, R.; Ormerod, J. Binder Jetting: A Novel NdFeB Bonded Magnet Fabrication Process. *JOM* **2016**, *68*, 1978–1982. doi:10.1007/s11837-016-1883-4.
  42. Li, L.; Tirado, A.; Conner, B.; Chi, M.; Elliott, A.M.; Rios, O.; Zhou, H.; Paranthaman, M.P. A novel method combining additive manufacturing and alloy infiltration for NdFeB bonded magnet fabrication. *J. Magn. Magn. Mater.* **2017**, *438*, 163–167. doi:10.1016/j.jmmm.2017.04.066.
  43. Li, L.; Post, B.; Kunc, V.; Elliott, A.M.; Paranthaman, M.P. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges. *Scr. Mater.* **2017**, *135*, 100–104. doi:10.1016/j.scriptamat.2016.12.035.
  44. Khazdozian, H.A.; Manzano, J.S.; Gandha, K.; Slowing, I.I.; Nlebedim, I.C. Recycled Sm-Co bonded magnet filaments for 3D printing of magnets. *AIP Adv.* **2018**, *8*, 056722. doi:10.1063/1.5007669.
  45. White, E.M.H.; Kassen, A.G.; Simsek, E.; Tang, W.; Ott, R.T.; Anderson, I.E. Net Shape Processing of Alnico Magnets by Additive Manufacturing. *IEEE Trans. Magn.* **2017**, *53*, 1–6.
  46. Ja'cimovi'c, J.; Binda, F.; Herrmann, L.G.; Greuter, F.; Genta, J.; Calvo, M.; Tomše, T.; Simon, R.A. Net Shape 3D Printed NdFeB Permanent Magnet. *Adv. Eng. Mater.* **2017**, *19*, 1700098.
  47. Mapley, M.; Pauls, J.P.; Tansley, G.; Busch, A.; Gregory, S.D. Selective laser sintering of bonded magnets from flake and spherical powders. *Scr. Mater.* **2019**, *172*, 154–158.
  48. Lamarre, J.-M.; Bernier, F. Permanent Magnets Produced by Cold Spray Additive Manufacturing for Electric Engines. *J. Therm. Spray Technol.* **2019**, *28*, 1709–1717.
  49. Ibrahim, M.; Bernier, F.; Lamarre, J.-M. Novel Multi-layer Design and Additive Manufacturing Fabrication of a High Power Density and Efficiency Interior PM Motor. In Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 11–15 October 2020; pp. 3601–3606.
  50. Additive Manufacturing Moves TUfast. Available online: <https://additivenews.com/additive-manufacturing-moves-tufast/> (accessed on 27 Giugno 2022).

51. European Powder Metallurgy Association (EPMA)—Cooling Jacket with Internal Helix Structure. Available online: <https://www.epma.com/spotlight-on-pm/cooling-jacket-with-internal-helix-structure> (accesso il 27 Giugno 2021).
52. Sixel, W.; Liu, M.; Nellis, G.; Sarlioglu, B. Cooling of Windings in Electric Machines via 3D Printed Heat Exchanger. In Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 23–27 September 2018; pp. 229–235.
53. Wrobel, R.; Mecrow, B. Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines—A Review. In Proceedings of the 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Athens, Greece, 22–23 April 2019; pp. 15–22.
54. Tate, J.G.; Richardson, B.S.; Love, L.J. Additive Manufacturing for Low Volume Bearings; Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge, TN, USA, 2017.
55. Wrobel, R.; Hussein, A. Design Considerations of Heat Guides Fabricated Using Additive Manufacturing for Enhanced Heat Transfer in Electrical Machines. In Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 23–27 September 2018; pp. 6506–6513.
56. Hošek, M.; Krishnasamy, J.; Sah, S.; Bashaw, T. Spray-Formed Hybrid-Field Electric Motor. In Proceedings of the 2016 ASME Design Engineering Technical Conference, Vancouver, BC, Canada, 17–21 July 2016; Volume 3.
57. Krishnasamy, J.; Hosek, M. Spray-Formed Hybrid-Field Traction Motor. *SAE Tech. Pap. Ser.* **2017**, 1.
58. W. W. Wits, D. Jafari, Y. Jeggels, S. van de Velde, D. Jeggels, and N. Engelberts, "Freeform-optimized shapes for natural-convection cooling," in Proc. 24rd Int. Workshop Thermal Investigations ICs Syst. (THER-MINIC), Sep. 2018.
59. M. Wong, I. Owen, C. J. Sutcliffe, and A. Puri, "Convective heat transfer and pressure losses across novel heat sinks fabricated by selective laser melting," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, nos. 1-2, pp. 281-288, Jan. 2009.
60. M. Fasano, L. Ventola, F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, E. Chiavazzo, and P. Asinari, "Passive heat transfer enhancement by 3D printed pitot tube based heat sink," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 74, pp. 3639, May 2016.
61. S. Krishnan, D. Hernon, M. Hodes, J. Mullins, and A. M. Lyons, "Design of complex structured monolithic heat sinks for enhanced air cooling," *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 266-277, Feb. 2012.

62. S. A. Semidey and J. R. Mayor, ``*Experimentation of an electric machine technology demonstrator incorporating direct winding heat exchangers*,'' IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5771-5778, Oct. 2014.
63. W. Sixel, M. Liu, G. Nellis, and B. Sarlioglu, ``*Cooling of windings in electric machines via 3-D printed heat exchanger*,'' IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 56, no. 5, pp. 4718-4726, Sep. 2020.
64. W. Sixel, M. Liu, G. Nellis, and B. Sarlioglu, ``*Ceramic 3D printed direct winding heat exchangers for improving electric machine thermal management*,'' in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep. 2019, pp. 769-776.
65. Wasim Jamshed, Kottakkaran Sooppy Nisar, Rabha W.Ibrahim, Faisal Shahzad, Mohamed R.Eid, ``*Thermal expansion optimization in solar aircraft using tangent hyperbolic hybrid nanofluid: a solar thermal application* `` Journal of Materials Research and Technology Volume 14, September–October 2021, Pages 985-1006.
66. Y. Gai, M. Kimiabeigi, Y. C. Chong, J. D. Widmer, X. Deng, M. Popescu, J. Goss, D. A. Staton, and A. Steven, ``*Cooling of automotive traction motors: Schemes, examples, and computation methods*,'' IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 3, pp. 1681-1692, Mar. 2019.
67. Additive Manufacturing is Moving Formula Student Team TUfast. [Online]. Available: <https://additivenews.com/additive-manufacturingmoves-tufast/> (Accesso il 28 Giugno 2022).
68. European Powder Metallurgy Association (EPMA)-Home. (Accesso il 28 Giugno2022). [Online]. Available: <https://www.epma.com/spotlight-onpm/cooling-jacket-with-internal-helix-structure> .
69. Additive Manufacturing for Sports Articles | EOS GmbH. (Accesso il 28 Giugno 2022). [Online]. Available: <https://www.eos.info/en/3dprinting-examples-applications/mobility-logistics/automotive-industry-3d-printing/motor-sports> .
70. C. Wohlers, P. Juris, S. Kabelac, and B. Ponick, ``*Design and direct liquid cooling of tooth-coil windings*,'' Electr. Eng., vol. 100, no. 4, pp. 22992308, Dec. 2018.
71. Sun, X.; Sizov, G.; Melfi, M. Asymmetrical Design in Electrical Machines. In Proceedings of the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 29 September–3 October 2019; pp. 3786–3792.
72. Nuzzo, S.; Marfoli, A.; Papini, L.; Bolognesi, P.; Gerada, C.; Galea, M. The potential of exploiting non-symmetric structures in electrical machines. In Proceedings of the

- IECON 2019 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 14–17 October 2019; Volume 2019, pp. 1393–1398.
73. Yang, H.; Wang, W.; Lin, H.; Zhu, Z.Q.; Lyu, S.; Niu, S. A Novel Hybrid-Pole Interior PM Machine with Magnet-Axis-Shifting Effect. In Proceedings of the 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, 12–15 May 2019; pp. 273–279.
74. Zhao, W.; Chen, D.; Lipo, T.A.; Kwon, B.-I. Performance Improvement of Ferrite-Assisted Synchronous Reluctance Machines Using Asymmetrical Rotor Configurations. *IEEE Trans. Magn.* **2015**, *51*, 1–4.
75. Krishnamurthy, M.; Edrington, C.; Emadi, A.; Asadi, P.; Ehsani, M.; Fahimi, B. Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products. *IEEE Trans. Power Electron.* **2006**, *21*, 659–675.
76. Edvard. Characteristics and Work Principles of Switched Reluctance (SR) Motor. 8 December 2014. Available online: <https://electrical-engineering-portal.com/characteristics-and-work-principles-of-switched-reluctance-sr-motor> (accesso il 28 Giugno 2022).
77. Ban, B.; Stipetic, S.; Klanac, M. Synchronous Reluctance Machines: Theory, Design and the Potential Use in Traction Applications. In Proceedings of the 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, 24–26 September 2019; Volume 2019, pp. 177–188.
78. Bianchi, N.; Bolognani, S.; Carraro, E.; Castiello, M.; Fornasiero, E. Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **2016**, *52*, 4762–4769.
79. Jurca, F.N.; Mircea, R.; Martis, C.; Martis, R.; Florin, P.P. Synchronous reluctance motors for small electric traction vehicle. In Proceedings of the 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Brno, Czech Republic, 12–14 May 2014; pp. 317–321.
80. Cai, S.; Shen, J.; Hao, H.; Jin, M. Design methods of transversally laminated synchronous reluctance machines. *China Electrotech. Soc. Trans. Electr. Mach. Syst.* **2017**, *1*, 164–173.
81. Guo, Y.; Zhu, J.; Dorrell, D. Design and Analysis of a Claw Pole Permanent Magnet Motor With Molded Soft Magnetic Composite Core. *IEEE Trans. Magn.* **2009**, *45*, 4582–4585.

82. Liu, C.; Lu, J.; Wang, Y.; Lei, G.; Zhu, J.; Guo, Y. Techniques for Reduction of the Cogging Torque in Claw Pole Machines with SMC Cores. *Energies* **2017**, *10*, 1541.
83. Liu, C.; Lu, J.; Wang, Y.; Lei, G.; Zhu, J.; Guo, Y. Design Issues for Claw Pole Machines with Soft Magnetic Composite Cores. *Energies* **2018**, *11*, 1998.
84. Galluzzi, R.; Amati, N.; Tonoli, A. Modeling, Design, and Validation of Magnetic Hysteresis Motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2020**, *67*, 1171–1179.
85. Jagieła, M.; Bumby, J.; Spooner, E. Time-domain and frequency-domain finite element models of a solid-rotor induction/hysteresis motor. *IET Electr. Power Appl.* **2010**, *4*, 185.
86. Oak Ridge National Laboratory. Available online: <https://www.ornl.gov/> (accesso 8 Luglio 2022).
87. Miller, J.M. Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program. 2013. Available online: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub46377.pdf> (accesso 8 Luglio 2022).
88. Ozpineci, B. Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Power Electronics and Electric Motors Program. 2014. Available online: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub52422.pdf> (accesso 8 Luglio 2022).
89. Burress, T. Electrical Performance, Reliability Analysis, and Characterization. Available online: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/edt087\\_burress\\_2017\\_o.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/edt087_burress_2017_o.pdf) (accesso 8 Luglio 2022).
90. Tesla Model 3 Battery/Motor/Glued Magnets. Available online: <https://www.electric-skateboard.builders/t/tesla-model-3-battery-motor-glued-magnets/78764> (accesso 8 Luglio 2022).
91. El-Refaie, A.M. Motors/generators for traction/propulsion applications: A review. *IEEE Veh. Technol. Mag.* **2013**, *8*, 90–99.

## SITOGRAFIA

- <https://ourworldindata.org/world-population-growth#:~:text=Two%20hundred%20years%20ago%20the,to%207.7%20billion%20in%202019.>
- <https://www.statista.com>
- [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/rare-earth-elements-permanent-magnets-and-motors\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/rare-earth-elements-permanent-magnets-and-motors_en)
- <https://erma.eu>
- <https://www.unleashedsoftware.com/blog/12-benefits-of-additive-manufacturing-and-5-disadvantages#:~:text=The%20benefits%20of%20additive%20manufacturing%20on%20supply%20chains%20takes%20many,proximity%20to%20the%20end%20User>
- [https://www.unive.it/pag/14024/?tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=10696&cHash=c0a6cc6a5d206751b5c058a9f974d28c](https://www.unive.it/pag/14024/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=10696&cHash=c0a6cc6a5d206751b5c058a9f974d28c)
- [https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works/sls-3d-printing?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=generic\\_EMEA&utm\\_content=wyn&gclid=Cj0KCQjw5ZSWBhCVARIsALERCvwOjtj8V99Uj-EHC2gT4O0qt\\_1IoNZASL526h6SEfWRzvsDg-CgNKYMaAs5tEALw\\_wcB](https://www.eos.info/en/industrial-3d-printing/additive-manufacturing-how-it-works/sls-3d-printing?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=generic_EMEA&utm_content=wyn&gclid=Cj0KCQjw5ZSWBhCVARIsALERCvwOjtj8V99Uj-EHC2gT4O0qt_1IoNZASL526h6SEfWRzvsDg-CgNKYMaAs5tEALw_wcB)
- <https://www.engineeringclicks.com/electron-beam-melting-ebm>
- <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout>
- <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5130151>
- [http://www.e-magnetica.pl/grain-oriented\\_electrical\\_steel](http://www.e-magnetica.pl/grain-oriented_electrical_steel)
- <https://www.additive-drives.de>
- <https://www.mdpi.com/journal/energies>
- <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-abstract/IDETC-CIE2016/50138/V003T01A034/257044>
- <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=28>
- <https://it.boydcorp.com/resources/temperature-control/heat-pipe-technology.html#:~:text=Il%20fluido%20pi%C3%B9%20comune%20%C3%A8,873%2D1%2C473%2%B0K>
- <https://tufast-racingteam.de>



- <https://www.greenteam-stuttgart.de>
- <https://www.innovationpost.it/2020/01/22/industria-il-futuro-e-3d-e-sara-una-vera-rivoluzione>
- <https://www.igus.it/info/3d-print-classic-car-spareparts>
- <http://www.refreedrive.eu>
- <https://www.electricmotorengineering.com/synchronous-reluctance-motor-a-rare-earth-free-solution-for-electric-vehicles>
- <https://www.innovationpost.it/2020/01/22/industria-il-futuro-e-3d-e-sara-una-vera-rivoluzione>
- <https://www.igus.it/info/3d-print-classic-car-spareparts>
- <https://www.univaq.it/section.php?id=220>