

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA

TESI DI LAUREA

in

METALLURGIA

**APPLICAZIONI DEGLI ACCIAI INOSSIDABILI IN SISTEMI PER LA
PRODUZIONE DI ENERGIA**

CANDIDATO

Beniamino Calabrese

RELATORE

Prof.ssa Carla Martini

Anno Accademico 2015/2016

Sessione I

INDICE

Introduzione e scopo	2
1. GLI ACCIAI INOSSIDABILI.....	3
1.1 Introduzione.....	3
1.2 Designazione degli acciai inossidabili.....	7
1.3 Acciai inossidabili martensitici	9
1.4 Acciai inossidabili ferritici	11
1.5 Acciai inossidabili austenitici.....	13
1.6 Acciai duplex.....	16
2. APPLICAZIONE DEGLI ACCIAI INOX IN IMPIANTI A TURBINA E NUCLEARI	18
2.1 Turbine per la produzione di energia.....	18
2.2 Impianti nucleari.....	22
3. APPLICAZIONI DEGLI ACCIAI INOX IN IMPIANTI PER LO SFRUTTAMENTO DI ENERGIE ALTERNATIVE	27
3.1 Solare	27
3.2 Geotermia.....	30
3.3 Biogas	32
3.4 Fotovoltaico	35
4. CONCLUSIONI	38
5. APPENDICE 1.....	39
6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	46

Introduzione e scopo

Questo elaborato ha lo scopo di esporre quelli che sono i vantaggi derivanti dall' utilizzo degli acciai inossidabili, specificando il tipo di componente e le ragioni della scelta, nei sistemi per la produzione di energia: dalle turbine, agli impianti nucleari, fino agli impianti che sfruttano le energie alternative (solare, eolica, geotermica, biogas). Inizialmente viene fornito un quadro generale sui differenti tipi di acciai inox (martensitici, ferritici, austenitici e duplex, con le relative proprietà, sottolineandone vantaggi e svantaggi), descrivendone anche i sistemi di designazione, con particolare attenzione alla norma AISI (American Iron and Steel Institute). Una volta messe in risalto queste caratteristiche, vengono esaminati e descritti diversi sistemi di produzione di energia in cui gli acciai inox trovano applicazione: si parte dalle turbine (idraulica, a vapore e a gas), spiegando i benefici nell'utilizzo di particolari categorie di acciai inox nella realizzazione di alcuni dei componenti per questi impianti. Vengono quindi esaminati gli impianti nucleari, partendo da quelli che utilizzano come moderatore e fluido refrigerante acqua naturale, ("PWR", *Pressurized Water Reactor*) e ("BWR", *Boiling Water Reactor*), fino a quelli che utilizzano invece acqua pesante ("CANDU", *Canadian Deuterium Uranium Reactor*), nonché i reattori veloci ("FBR", *Fast Breeding Reactor*). Infine, vengono esaminate le applicazioni degli acciai inox, nei sistemi per la produzione di energia che, sfruttano fonti alternative (elencate in precedenza).

Capitolo 1: Gli acciai inossidabili

1.1 Introduzione

Gli acciai inossidabili sono leghe a base di ferro, cromo, carbonio e altri elementi quali: nichel, molibdeno, manganese, silicio, titanio ecc., che li rendono particolarmente resistenti ad alcuni tipi di corrosione. Tra i vari elementi presenti nella lega, quello preponderante deve essere il cromo, poiché queste leghe devono resistere molto bene ad un attacco corrosivo, (proprietà messa in luce da Tamman, Fig 1.1). La caratteristica di resistere bene ad un attacco corrosivo, è dovuta al fatto che questi acciai riescono a passivarsi in un ambiente sufficientemente ossidante (ad esempio in: aria) grazie alla formazione di una pellicola superficiale di Cr_2O_3 , e in queste particolari condizioni, l'acciaio inossidabile è allo stato "passivo". La pellicola passiva si riforma quando si lacera, se l'ambiente è sufficientemente ossidante e se l'ossigeno può pervenire a contatto con la lega, proteggendo il materiale sottostante dall'attacco corrosivo. I risultati dell'esperienza di Tamman vengono mostrati in figura 1.1 ^[1].

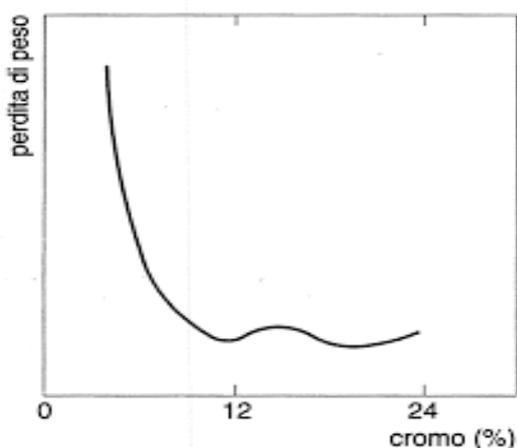


Fig 1.1 Andamento della percentuale di cromo in lega per ottenere la minor perdita di peso in ambiente corrosivo ^[1]

In questa figura infatti viene mostrato come per una percentuale di $\text{Cr} > 10.5\%$, si ottenga la minor perdita di peso in ambiente corrosivo. Come, specificato in precedenza gli acciai inossidabili sono leghe complesse, in cui entrano in gioco diversi elementi. Per tale motivo è utile ricordare che gli acciai ordinari, non legati, sono leghe ferro-carbonio con un tenore in massa di ferro maggiore di quello di ciascuno degli altri elementi, in cui il tenore di carbonio è generalmente minore del 2.1%. Il diagramma di stato ferro-carbonio è, riportato in figura

1.2 ^[2]. In questo diagramma vengono descritti i fenomeni che avvengono in acciai e ghise durante la solidificazione o il riscaldamento in condizioni di equilibrio; il diagramma Fe-C inoltre permette di interpretare le microstrutture di acciai e ghise al variare della composizione e della temperatura.

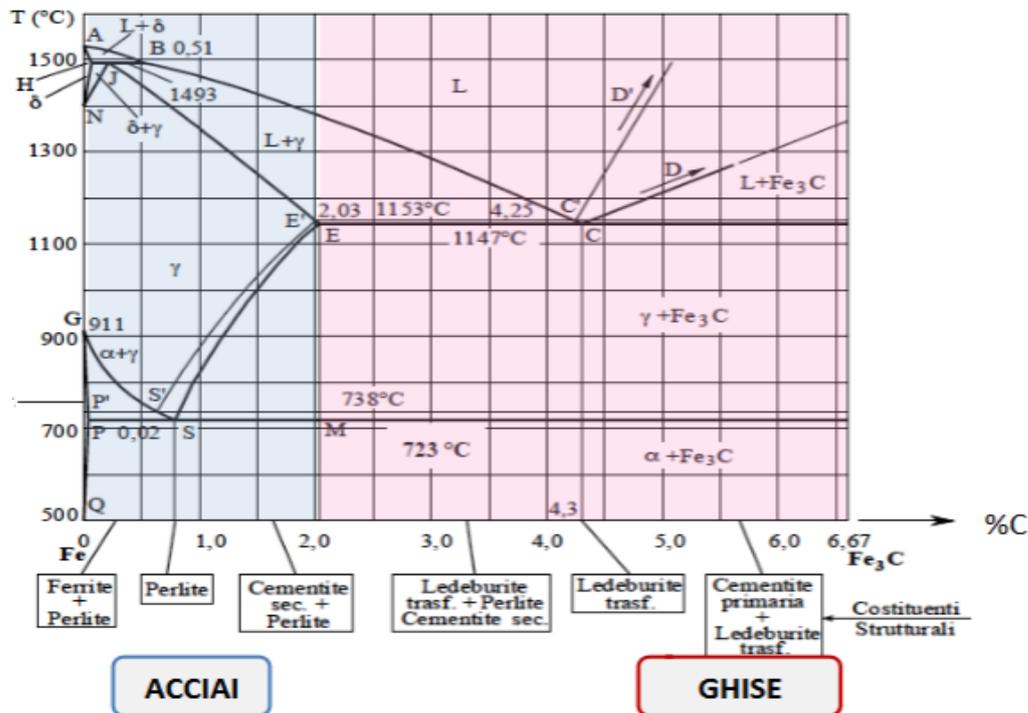


Fig 1.2 Diagramma di stato Fe-C per l' interpretazione delle microstrutture di acciai e ghise al variare della composizione e della temperatura ^[2]

Il diagramma in Fig 1.2 ^[2] presenta un composto di formula Fe_3C (carburo di ferro), comunemente chiamato cementite. La porzione del diagramma che si prende in considerazione è quella con un contenuto di carbonio corrispondente alla composizione stechiometrica della cementite (6.67% in peso): per questo infatti sarebbe più corretto parlare di diagramma ferro-cementite. La cementite è un composto metastabile, mostrando la tendenza a decomporsi secondo la seguente reazione: $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$. Nel diagramma ferro-carbonio in figura 1.2 ^[2], nell'intervallo relativo agli acciai (C: 0.01-2.00% in peso), si possono considerare i seguenti punti di trasformazione:

- 1) **PSM** temperatura di equilibrio nella trasformazione austenite \rightarrow ferrite + cementite;
- 2) **GS** temperatura di equilibrio nella trasformazione austenite \rightarrow ferrite;

3) **SE** temperatura di equilibrio nella trasformazione austenite → cementite;

La soluzione solida di carbonio nel ferro alfa prende il nome di ferrite, quella nel ferro gamma di austenite. Il ferro puro, allo stato solido presenta tre forme allotropiche: ferro alfa, ferro gamma e il ferro delta. Il ferro alfa ha una struttura cristallina cubica a corpo centrato (CCC), stabile fino a 912°C, il ferro gamma ha una struttura cristallina a facce centrate (CFC), stabile tra 912°C e 1394°C, mentre il ferro delta presenta una struttura cristallina cubica a corpo centrato (CCC), stabile tra 1394°C e 1536°C, ovvero la temperatura di fusione^[3]. Queste tre forme allotropiche del ferro sono in grado, in misura diversa, di dar luogo a soluzioni solide con il carbonio, oltre che combinarsi con questo per formare la cementite. Nel diagramma Fe-Fe₃C le fasi presenti sono le seguenti: (i) fase alfa (ferrite): soluzione solida interstiziale formata da piccole quantità di carbonio nel reticolo CCC del ferro alfa. La presenza di atomi di carbonio nel reticolo CCC del ferro alfa produce delle notevoli distorsioni, per questo la solubilità del carbonio nel ferro alfa è molto limitata e può raggiungere un valore massimo dello 0.02% (a 727°C)^[2]; (ii), fase gamma (austenite): soluzione solida interstiziale del carbonio nel ferro gamma (CFC). La struttura cristallina del ferro gamma, favorisce una maggiore solubilità del carbonio, dalla figura 1.2 si nota infatti un campo di stabilità dell'austenite decisamente più ampio. Infine, (iii) la fase delta: cioè la soluzione interstiziale del carbonio nel ferro delta (CCC). Valgono per questa fase considerazioni analoghe a quelle fatte sulla ferrite alfa. La fase Fe₃C (Cementite) invece è un composto intermetallico duro e fragile, costituito da ferro e carbonio, in cui la percentuale di quest'ultimo elemento è pari al 6.69% in massa. Per quanto riguarda gli acciai inossidabili, entrano in gioco anche altri elementi come il cromo e il nichel, ed è per questo motivo che verranno analizzati anche i diagrammi di stato ferro-cromo (Fig. 1.3)^[1] e ferro-nichel (Fig. 1.4)^[1].

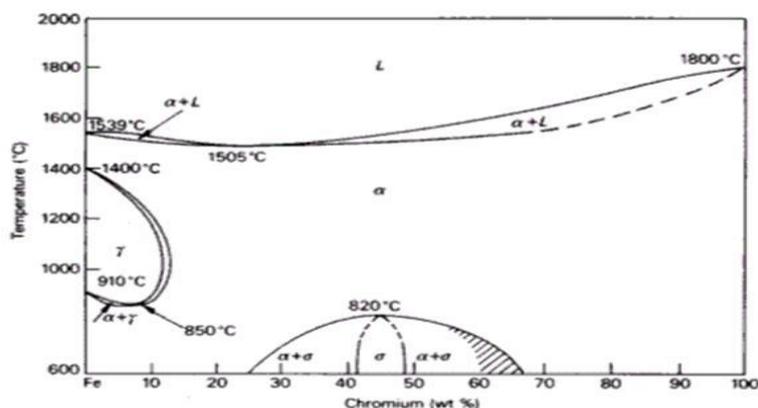


Fig 1.3 Diagramma Fe-Cr: rappresentazione dell' azione alfagena o ferritizzante del Cr, analogamente a Mo, Si, Ti, Nb, Ta, Al^[1]

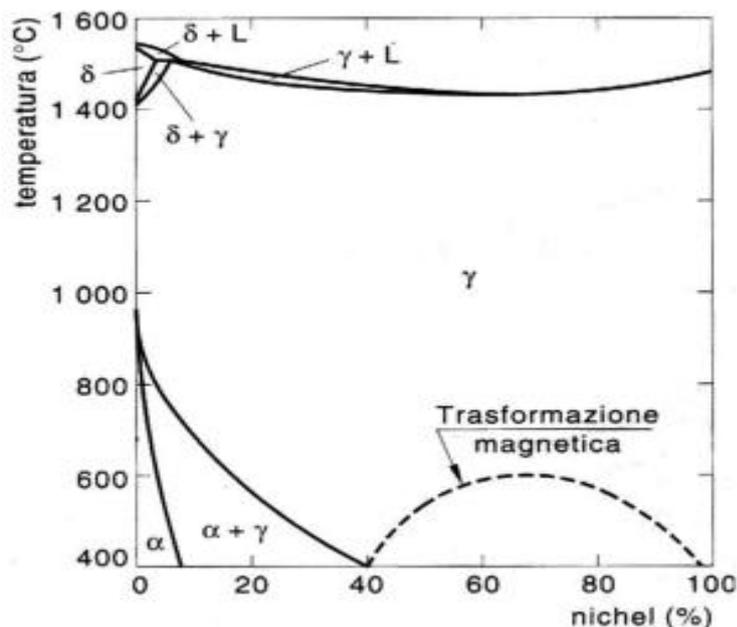


Fig 1.4 Diagramma Fe-Ni: rappresentazione dell' azione gammagena o austenitizzante del nichel ^[1]

Partendo dal diagramma di stato ferro-cromo rappresentato in Figura 1.3 ^[1], si nota la particolare azione alfa-gena o ferritizzante del cromo, che restringe il campo di esistenza del ferro gamma per favorire il dilatarsi di quello del ferro alfa, analogamente a: silicio, molibdeno, titanio, niobio e tantalio. Osservando il diagramma, è possibile notare, per tenori di cromo fino al 12% in peso, l'esistenza di un campo chiuso del ferro gamma. Cosicché per leghe aventi tenore di cromo inferiore al limite predetto, si ha, partendo dal solido, prima la separazione di ferrite, poi la trasformazione in austenite e infine la ritrasformazione finale in ferrite. Un'altra osservazione da fare è quella di considerare l'esistenza di una nuova fase "sigma", la cui formazione è lenta a T minori di 600 °C, mentre la massima velocità si ha a T = 650-900°C. Questa fase può essere presente negli acciai inossidabili, specialmente con alti tenori di cromo, e si può originare sia da trasformazioni che avvengono nella ferrite, sia da quelle che si verificano nell'austenite. Infine è opportuno ricordare che la presenza della fase sigma negli acciai inossidabili è da considerarsi deleteria sia per quanto riguarda la tenacità, sia per quanto concerne la resistenza alla corrosione. Analizzando ora il diagramma di stato ferro-nichel di Figura 1.4 ^[1], si evince la netta azione gammagena o austenitizzante del nichel, che al contrario del cromo, allarga il campo di esistenza del ferro gamma riducendo quello del ferro alfa e del ferro delta, analogamente ad altri elementi quali: il manganese, l'azoto e il

rame. Il nichel aumenta anche la resistenza alla corrosione ed assicura tenacità e deformabilità a freddo. Da ultimo, si può notare che per tenori di nichel oltre il 40% si osserva una trasformazione magnetica (cioè la lega diventa magnetica).

1.2 Designazione degli Acciai Inossidabili

Innanzitutto, come per altri materiali metallici, ferrosi e non, esistono differenti modi di designazione. I sistemi di designazione degli acciai inossidabili, che comunque sono validi per qualsiasi tipo di acciaio, si riferiscono essenzialmente a: classificazioni, unificazioni, e capitoli di accettazione. La classificazione consiste in una particolare suddivisione di tutti i tipi di acciai inossidabili in classi o serie, a loro volta divisi in tipi. Un determinato tipo di acciaio viene identificato grazie ad alcune caratteristiche (chimiche, fisiche, meccaniche), per le quali vengono indicati o i valori estremi di minimo e di massimo, oppure dei valori indicativi. I limiti, vengono fissati con un' ampiezza abbastanza consistente, in modo da far rientrare in un dato tipo tutti gli acciai equivalenti. Le classificazioni più conosciute per gli acciai inossidabili sono: AISI (American Iron and Steel Institute) e SAE (Society of Automotive Engineers) ^[1]. La classificazione AISI divide gli acciai inossidabili in:

- 1) **Acciai austenitici al cromo-manganese-nichel**, designati da tre cifre a partire da una cifra qualificante, che in questo caso è il 2, (serie 2xx), mentre le ultime due cifre (xx), servono solamente per distinguere un tipo da un altro ^[1];
- 2) **Acciai austenitici al cromo-nichel**: serie 3xx, in analogia con quanto menzionato sopra ^[1];
- 3) **Acciai ferritici e martensitici al solo cromo**: serie 4xx ^[1];

In Tabella 1.1^[3] sono riportati i principali acciai inox designati secondo la normativa AISI.

Steel	% C	% Cr	% Ni	Others	Tensile Strength (psi)	Yield Strength (psi)	% Elongation	Condition
Austenitic:								
201	0.15	17	5	6.5% Mn	95,000	45,000	40	Annealed
304	0.08	19	10		75,000	30,000	30	Annealed
					185,000	140,000	9	Cold-worked
304L	0.03	19	10		75,000	30,000	30	Annealed
316	0.08	17	12	2.5% Mo	75,000	30,000	30	Annealed
321	0.08	18	10	0.4% Ti	85,000	35,000	55	Annealed
347	0.08	18	11	0.8% Nb	90,000	35,000	50	Annealed
Ferritic:								
430	0.12	17			65,000	30,000	22	Annealed
442	0.12	20			75,000	40,000	20	Annealed
Martensitic:								
416	0.15	13		0.6% Mo	180,000	140,000	18	Quenched and tempered
431	0.20	16	2		200,000	150,000	16	Quenched and tempered
440C	1.10	17		0.7% Mo	285,000	275,000	2	Quenched and tempered
Precipitation hardening:								
17-4	0.07	17	4	0.4% Nb	190,000	170,000	10	Age-hardened
17-7	0.09	17	7	1.0% Al	240,000	230,000	6	Age-hardened

Tabella 1.1 Designazioni e proprietà degli acciai inox secondo la norma AISI ^[3]

Per gli acciai inossidabili la norma ISO designata è la ISO/XII-86, definita "norma madre", poi esistono anche delle altre norme ISO che comprendono sempre gli acciai inossidabili, per impieghi specifici. Negli ultimi decenni del XX secolo, gli organi normativi comunitari hanno emesso delle norme europee, designate con la sigla EN, definite da apposite commissioni, nelle quali tutti i Paesi membri dell'Unione Europea si riconoscono. La norma generale riferita al comparto dei prodotti finiti d'acciaieria inossidabili è la UNI-EN 10088, il cui contenuto viene suddiviso in tre parti: la prima parte (UNI-EN 10088-1) contiene l'elenco dei vari acciai inossidabili con composizione chimica e caratteristiche fisiche, in appendice è riportata la descrizione dei vari tipi o famiglie. La seconda parte (UNI-EN 10088-2), specifica le condizioni tecniche di fornitura di lamiere e nastri a caldo/freddo oltre a fornire riferimenti normativi, mentre nella terza parte (UNI-EN 10088-3) sono contenuti gli stessi elementi della seconda parte riferiti però a semilavorati, barre, vergelle e profili per impieghi generali. La designazione che riguarda gli acciai inossidabili, utilizzata nella norma suddetta, è stabilita dalla UNI-EN 10027, che vale in generale per tutti gli acciai. La sezione della norma UNI-EN 10027 che riguarda gli acciai inossidabili è quella relativa alla designazione per composizione chimica, in particolare riferendosi agli acciai alto-legati in cui almeno un elemento di lega è presente in tenori maggiori del 5% in peso. Un esempio di designazione per gli acciai inox ad

esempio è: **X10CrNi1310**, cioè un tipo di acciaio inox dove il numero 10 indica la percentuale di C moltiplicata per 100 (C: 0.1% in peso), mentre il numero 13 e il numero 10 dopo la sigla CrNi indicano le rispettive percentuali di Cr ed Ni presenti in lega. Per concludere, bisogna sottolineare anche la presenza dei capitoli di accettazione, ovvero di un insieme di specifiche tecniche che riguardano le caratteristiche di prodotti di acciaieria (lamiere, tubi, barre, nastri, ecc.) per diversi tipi di applicazioni. Tra i vari tipi di specifiche, quelli più usati sono gli standards dell' ASTM (American Society for Testing and Materials), che per quel che riguarda il settore degli acciai inossidabili, ricoprono un campo molto vasto, che va dalle lamiere di elevato spessore, a quelle sottili, ai materiali per bulloneria, ai tubi senza saldatura, ai scambiatori di calore, ai fili, ecc ^[1].

1.3 Acciai inossidabili martensitici

Gli acciai inossidabili martensitici sono acciai al solo cromo (11-19%), in modo tale da avere resistenza a corrosione adeguata, contenenti a volte anche piccole quantità di altri elementi quali ad esempio il nichel (in quantità però non superiori al 2.5%). I tenori di carbonio invece possono variare (0.08-1.2%), ma sono comunque maggiori di quelli presenti negli altri inox ^[1]. Questa tipologia di acciai presenta come tutte le categorie degli inox dei vantaggi e degli svantaggi. I vantaggi sono: elevata resistenza meccanica, ferromagnetismo. Mentre tra gli svantaggi si ha la minor resistenza alla corrosione rispetto agli altri inox, e il fatto di essere suscettibili ad infragilimento ad idrogeno per via dell' alta durezza ^[3]. Procedendo nella descrizione degli acciai inossidabili martensitici, ci si soffermerà su particolari tipologie di questi inox, quali:

- **acciai AISI 403 e 410**: sono acciai con basso tenore di carbonio, in genere tra 0.08-0.15%, possiedono allo stato ricotto buone possibilità di formatura a freddo e anche una discreta lavorabilità alle macchine utensili per asportazione di truciolo. Questi tipi di acciai sono in genere utilizzati per costruire: viti autofilettanti, forbici, coltelli monoblocco, canne per armi da fuoco, palette per turbine a vapore ^[1];

- **acciaio AISI 420**: questo acciaio ha un contenuto intermedio di carbonio, in genere minore o uguale al 30%, ed è proprio in base al contenuto di carbonio, che dopo un adeguato trattamento termico di tempra, hanno la possibilità di raggiungere valori di durezza abbastanza elevati, insieme a buone caratteristiche di tenacità. Possibili esempi di impiego sono: lame e coltelli, degli strumenti chirurgici, per attrezzi manuali (cacciaviti, alberi per pompe e per valvole) ^[1];

acciai AISI 414 e 431: sono acciai che contengono una quantità di nichel tra 1.25-2.5%, oltre a maggiori tenori di cromo. Hanno la maggiore resistenza alla corrosione con elevata resistenza meccanica ed elevata durezza. I possibili impieghi possono essere: alberi portaelica, molle, viti, giranti per le centrifughe delle macchine scrematrici del latte, macchinari per l'industria ^[1];

- **acciai AISI 440A, 440B, 440C:** sono gli inox martensitici con il più elevato tenore di cromo, circa il 18%, ed elevate percentuali di carbonio (1.2%). Questa composizione comporta la formazione di microstrutture a base di martensite e di carburi, che incrementano durezza e resistenza all'usura. Gli impieghi connessi con queste proprietà sono tipicamente: strumenti siderurgici ed odontoiatrici, cuscinetti a sfere, blocchetti di riscontro, coltelleria speciale ^[1];

Per quanto riguarda invece le caratteristiche fisiche di questi acciai, si può dire che essi presentano una massa volumica di 7.7 kg/dm³, un modulo di elasticità che cala con il crescere della temperatura come indicato in Tabella 1.2.

<u>Temperatura (°C)</u>	<u>Modulo di elasticità (kN/mm²)</u>
20	215
100	212
200	205
300	200
400	190

Tabella 1.2 Andamento del modulo di elasticità degli acciai inox martensitici con la temperatura^[1]

Essi hanno un coefficiente medio di dilatazione termica tra 20°C e 400°C, che varia tra 10 e 12*10⁻⁶ K⁻¹, ed un calore specifico a 20°C che varia tra 430-460 J/Kg°K. Tutte queste proprietà riferite agli acciai inossidabili martensitici, poco si discostano da quelle degli acciai al carbonio e basso-medio legati. Più elevata invece risulta la resistività specifica, al contrario della conducibilità termica che risulta inferiore, almeno per temperature non superiori ai 900°C. Inoltre la permeabilità magnetica degli acciai inossidabili martensitici, permette di

classificarli tra i materiali ferromagnetici. Essa ha un valore che per i tipi AISI 410 e AISI 416 oscilla tra $\mu_r=700-1000$, dove μ_r è la permeabilità magnetica relativa data da μ/μ_0 , con μ :[H/m], calcolato dal rapporto tra il valore di induzione magnetica B e il valore della forza magnetizzante H e μ_0 si riferisce al valore della permeabilità magnetica del vuoto ($\mu_0=1.256 \cdot 10^{-6}$ H/m). Analizzando invece le caratteristiche meccaniche degli acciai inossidabili martensitici, per temperature inferiori alla temperatura ambiente, si evidenzia un abbassamento della tenacità. Questo abbassamento di tenacità comporta anche un abbassamento del valore dell'allungamento a rottura e della strizione, ed un aumento dei valori del carico unitario di rottura, del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità e di durezza. Negli inox martensitici il passaggio da una frattura di tipo duttile a una di tipo fragile si manifesta a temperature tanto più basse, quanto minori sono le quantità di ferrite o di altre strutture intermedie in esse contenute. Ed è per questo motivo, che quando questi inox sono posti a temperature basse (cioè inferiori a 0 °C), è necessario eseguire un trattamento di bonifica, producendo una microstruttura di martensite rinvenuta. Ad elevate temperature invece le caratteristiche meccaniche degli acciai inossidabili martensitici, si possono esemplificare nel caso dell'AISI 403 e 410, ovvero i due tipi di acciai maggiormente impiegati ad alte temperature. Questi due inox infatti hanno buone caratteristiche resistenziali a caldo fino a temperature di 650°C, e hanno buone caratteristiche di resistenza all'ossidazione che permette il loro uso nella costruzione di palettature per turbine a vapore ^[1].

1.4 Acciai inossidabili ferritici

Questo tipo di acciai inox è costituito da leghe ferro-cromo-carbonio, eventualmente con lievi aggiunte di altri elementi come il molibdeno. Gli acciai ferritici presentano un tenore di cromo compreso tra 10.5-30% e tenori di carbonio molto bassi, solitamente al disotto dello 0.1%. Su questi acciai è possibile applicare lavorazioni per deformazione a freddo (trafilatura, laminazione, ecc.), atte a generare un incrudimento, per aumentare le caratteristiche meccaniche. Tra i tipi di acciai inossidabili ferritici più usati si possono ricordare:

- I. **AISI 405**, che contiene in lega l'alluminio oltre al cromo, studiato per ottenere buone caratteristiche di tenacità nelle strutture saldate;
- II. **AISI 409**, denominato anche "muffler grade", facilmente lavorabile per deformazione plastica a freddo e che dà luogo a saldature abbastanza tenaci. E' stato studiato per la realizzazione di silenziatori degli scarichi per autovetture;

- III. **AISI 430**, il tipo di acciaio ferritico più diffuso, è facilmente lavorabile a freddo, presenta buone caratteristiche di resistenza alla corrosione sia a temperatura ambiente, sia a temperature anche più elevate. Molto impiegato nell'industria automobilistica, in quella degli elettrodomestici e in quella chimica;
- IV. **AISI 434**, derivazione del 430, però con aggiunta di molibdeno, così da migliorare le caratteristiche di resistenza alla corrosione. Viene impiegato nella costruzione di particolari automobilistici;
- V. **AISI 436**, è sempre una derivazione del 430, con aggiunta di molibdeno e di niobio, in modo da migliorare la resistenza alla corrosione e la resistenza al calore;
- VI. **AISI 442**, è un acciaio con elevato tenore di cromo, che conferisce particolari caratteristiche di resistenza all'ossidazione al caldo, per questo utilizzato in parti di forni e di camere di combustione;
- VII. **AISI 446**, acciaio ferritico con il maggiore contenuto di cromo, molto resistente all'ossidazione a caldo fino a 1200°C. Il suo settore di utilizzo generalmente è un settore ad alte temperature, come: stampi per vetro, recuperatori di calore, parti di forni ^[1];

Quindi volendo ricapitolare vantaggi e svantaggi degli acciai inossidabili ferritici, è possibile far riferimento alla tabella 1.3 ^[2].

Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> .buona resistenza alla corrosione, superiore a quella dei martensitici, ma inferiore agli austenitici . magnetici . buona deformabilità . meno costosi degli austenitici . più resistenti alla corrosione sotto tensione da cloruri, rispetto agli austenitici 	<ul style="list-style-type: none"> .presenza di temperatura di transizione fra comportamento duttile e fragile in prove di resilienza .suscettibili ad infragilimento ad idrogeno .saldabili,ma con tendenza all'ingrossamento dei grani

Tabella 1.3 Analisi dei vantaggi e svantaggi degli inox ferritici ^[2]

In termini di caratteristiche fisiche, questa classe di acciai inossidabili, presenta una massa volumica che diminuisce con l'aumentare del tenore di cromo, ed in genere è leggermente inferiore a quella degli acciai martensitici, infatti in questo caso oscilla tra (7.5 - 7.7) kg/dm³. La resistività elettrica è superiore rispetto ai martensitici ed aumenta al crescere del tenore di cromo presente nell'acciaio, mentre per le altre caratteristiche fisiche, gli acciai inox ferritici sono simili ai martensitici. Anche gli acciai inossidabili ferritici, sono ferromagnetici in tutte le condizioni di temperatura e presentano una permeabilità magnetica che oscilla tra 600-1100 H/m. Inoltre in questi acciai, come per i martensitici, l'incrudimento non ha particolare effetto sulle caratteristiche magnetiche, e una minore influenza sulle caratteristiche che riguardano la resistenza alla corrosione rispetto agli austenitici. L'incrudimento però comporta un aumento del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità, maggiore di quello che si verifica per il carico di rottura, e un abbassamento dell' allungamento a rottura. Le caratteristiche meccaniche a temperature inferiori a quella ambiente, mostrano come gli inox ferritici siano i meno adatti tra gli inossidabili agli impieghi a queste temperature. Infatti, a temperature appena inferiori a quella ambiente, si verifica un brusco abbassamento della tenacità. A temperature superiori quella ambiente, le caratteristiche meccaniche non sono molto elevate, e quindi i valori dei carichi di rottura e di scorrimento viscoso sono abbastanza bassi. Gli acciai inox ferritici possiedono anche una buona resistenza all'ossidazione a caldo, che aumenta con il crescere del contenuto di cromo in lega. Un esempio, può essere l'AISI 446, che ha una grande resistenza allo scagliamenti, resistendo fino a temperature di 1200°C. Per completare la trattazione sui acciai inossidabili ferritici, si possono ricordare anche i ferritici denominati ELI (*Extra Low Interstitial*), apparsi sul mercato in tempi successivi rispetto ai ferritici tradizionali, caratterizzati da un basso contenuto di carbonio più azoto (0.02-0.05%). Questa categoria di inox possiede caratteristiche di resistenza alla corrosione superiori rispetto a quelle dei ferritici convenzionali, maggiore resistenza alla corrosione sotto sforzo e caratteristiche meccaniche paragonabili sempre rispetto ai ferritici tradizionali ma con resilienza che presenta una temperatura di transizione più bassa ^[1].

1.5 Acciai inossidabili austenitici

Gli acciai austenitici sono quelli che, oltre al cromo, (16-28%), contengono nichel (6-32%) e tenori di carbonio molto bassi, al disotto dello 0.15%. Questi acciai si possono classificare in due gruppi: gli austenitici al cromo-nichel e quelli al cromo-manganese-nichel. Il primo di questi due gruppi, è quello più importante, poichè ad esso appartengono la maggior parte

degli acciai inossidabili comunemente adottati ed è formato da leghe ferro-carbonio-cromo-nichel, con l'aggiunta di altri elementi quali: molibdeno, titanio, niobio ecc. In questi acciai sono presenti quantità di carbonio comprese tra valori inferiori allo 0.03% e valori dell'ordine di 0.25%, cromo in quantità tra 17% e 26%, e nichel tra il 7% e 22%. Nella classificazione AISI vengono indicati come serie "300". Infatti gli AISI 301, AISI 302, AISI 304, AISI 305, AISI 308, AISI 384, si differenziano tra di loro in base alla quantità di nichel presente, che crescendo, fa presentare agli acciai un minore incrudimento durante le lavorazioni per deformazione plastica. Essi possiedono inoltre caratteristiche meccaniche non elevate a temperatura ambiente, e ottime a temperature anche molto basse. Gli acciai AISI 316 e 317, si distinguono dai precedenti per la presenza di molibdeno, che conferisce loro una particolare resistenza alla corrosione. Gli AISI 321, AISI 347, AISI 348 invece sono detti stabilizzati e derivano dall' AISI 304 con opportune aggiunte di elementi stabilizzanti, quali: il titanio e il niobio con tantalio. Proprietà comune a tutti gli acciai stabilizzanti è quella di evitare la precipitazione dei carburi (fenomeno di sensibilizzazione), nell' intervallo di temperatura tra 450°C e 850°C, in virtù della presenza di elementi stabilizzanti come il titanio e il niobio. Per quel che riguarda invece gli inox resistenti ad alte temperature, si possono ricordare gli acciai AISI 309, AISI 310, AISI 314, chiamati anche refrattari proprio per indicare le elevate caratteristiche di resistenza alla corrosione e resistenza meccanica che dimostrano a caldo. Ciò è una conseguenza degli alti tenori di cromo e nichel presenti in lega, unitamente ad alte percentuali di carbonio, che nel caso degli AISI 309, AISI 310 e AISI 314 sono nell'ordine di 0.2-0.25%, superiori rispetto a quelli presenti negli altri acciai inossidabili austenitici al cromo-nichel. Infatti ciò permette di ottenere valori di resistenza a scorrimento viscoso relativamente elevati. Per analizzare le caratteristiche fisiche, ci si rifà soprattutto a quelle dei tipi al cromo-nichel, che sono i più diffusi. Questi inox a temperatura ambiente o a temperature di poco superiori, hanno moduli elastici a trazione e a compressione equivalenti, più o meno intorno ai 200 kN/mm². Il modulo elastico vale 76-78 kN/mm² e il coefficiente di Poisson varia tra 0.26 e 0.3. La massa volumica è un pò superiore a quella degli altri acciai inossidabili (8kg/dm³), mentre la conducibilità termica, il coefficiente di dilatazione termica, la resistività elettrica sono molto differenti dai valori degli acciai legati non inossidabili. Infatti la conducibilità termica è molto ridotta (12-15 W/m°K), al contrario del coefficiente di dilatazione lineare e della resistività elettrica, che risultano maggiori in questi acciai, rispetto ai martensitici e ai ferritici. Per temperature al di sotto di quella ambiente, la massa volumica aumenta con il diminuire della temperatura, mentre la resistività elettrica, la conducibilità

termica, il coefficiente di dilatazione termica e il calore specifico diminuiscono con leggi diverse in funzione della temperatura. Quando invece le temperature sono al di sopra della temperatura ambiente si ha una riduzione del modulo di elasticità, della massa volumica, aumentano con la temperatura il coefficiente di dilatazione termica, il calore specifico, il coefficiente di conducibilità termica e la resistività elettrica. Un'altra caratteristica importante di questi acciai è quella di essere particolarmente soggetti al fenomeno dell'incrudimento, così da raggiungere, dopo deformazione plastica a freddo, valori rilevanti del carico di rottura e di carico di snervamento, mantendo valori elevati di allungamento a rottura e strizione. La permeabilità magnetica degli acciai inossidabili, è in genere molto bassa, vicina a quella del vuoto, tanto da essere considerati materiali amagnetici. Questa permeabilità tende ad aumentare con l'aumentare dell'incrudimento, fenomeno facilmente riscontrabile sui prodotti ricavati per lavorazione per deformazione a freddo quali le molle, le viti e fili trafilati che non abbiano subito dopo la lavorazione un trattamento di solubilizzazione ^[1]. Inoltre, per temperature inferiori a quella ambiente, il comportamento a resilienza degli acciai inox austenitici, si differenzia da quello dei martensitici e ferritici, come si nota in figura 1.5 ^[4].

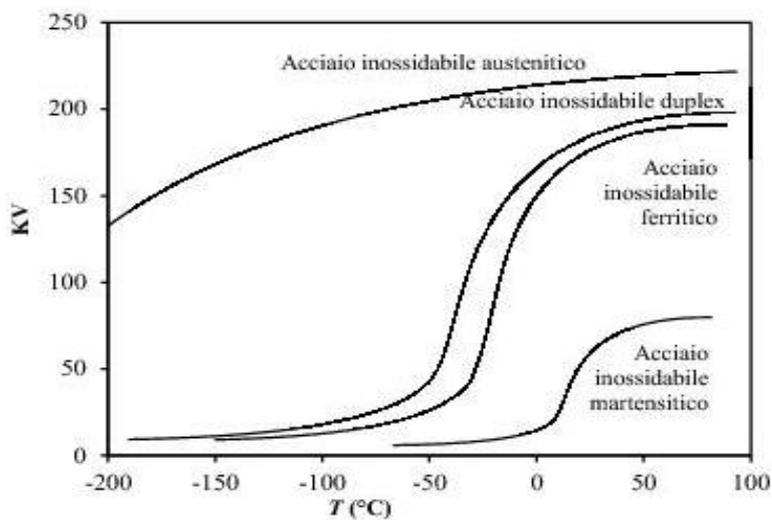


Figura 1.5 Andamento della resilienza negli acciai inox al variare della temperatura ^[4]

Infatti, con il diminuire della temperatura, gli austenitici presentano solo un calo leggero della resilienza, mentre ferritici e martensitici sono caratterizzati da un brusco abbassamento dei valori della resilienza. Inoltre, con l'abbassarsi della temperatura, gli acciai inossidabili austenitici aumentano molto le caratteristiche resistenziali mentre diminuiscono l'allungamento a rottura e la strizione. Per ciò che invece riguarda gli acciai inossidabili

austenitici del secondo gruppo, quelli al cromo-manganese-nichel, (studiati intorno agli anni '30, con uno sviluppo collegato ad eventi bellici che hanno ridotto la disponibilità del nichel, quali la seconda guerra mondiale, la guerra di Corea, ecc), definiti secondo AISI come serie "200", dove parte del nichel (4%) è sostituito con altri elementi austenitizzanti quali il manganese (presente per circa il 7%) e l'azoto contenuto in ragione non più dello 0.25%. Questi incrudiscono maggiormente di quelli al cromo-nichel e presentano un carico di snervamento maggiore sia nel caso di materiale addolcito che incrudito. Le caratteristiche meccaniche a temperature elevate sono superiori a quelle degli austenitici al cromo-nichel, mentre la resistenza alla corrosione è inferiore ^[1].

1.6 Acciai duplex

Gli acciai duplex sono detti anche austeno-ferritici o *dual phase* e, sono caratterizzati da un contenuto di cromo maggiore del 16%, associato a nichel e molibdeno (Cr=18-28%; Ni=4-6%, Mo=1.5-3%). L'evoluzione nell'impiego di questi acciai è principalmente da associare alle elevate caratteristiche meccaniche (carico di snervamento doppio rispetto agli acciai austenitici) ed al miglior comportamento nei confronti della corrosione sotto tensione e per vaiolatura. Le caratteristiche meccaniche e fisiche possono essere influenzate, a parità di composizione chimica, andando a dosare il rapporto tra ferrite e austenite. Questo rapporto, che in genere si aggira tra il 50/50% e può oscillare da 30/70% a 60/40%, influenza il comportamento seguendo le caratteristiche della struttura dominante, nel senso che aumentando il contenuto di ferrite si riducono le caratteristiche meccaniche, aumentando invece il contenuto di austenite si riduce la resistenza alla tensocorrosione. Gli acciai inossidabili austeno-ferritici sono indicati in quelle applicazioni dove sia necessaria una buona saldabilità, elevate caratteristiche meccaniche e resistenza alla corrosione in ambiente difficili come quelli fortemente acidi e in acqua di mare. Le caratteristiche meccaniche a temperatura ambiente sono maggiori di quelle dei ferritici, la resistenza a caldo è intermedia tra quella dei ferritici e degli austenitici ed infine questi acciai presentano anche buone caratteristiche di resistenza all'ossidazione a caldo fino a 1100°C. Tra i limiti di questi inox, si può ricordare invece l'elevato costo e la possibile fragilità a caldo^[1]. In Appendice 1 sono riportate tabelle di sintesi che mostrano le principali proprietà meccaniche e la resistenza a corrosione delle diverse classi di acciai inox appena descritti. In modo sintetico, le principali classi di acciai possono essere messe a confronto in termini di comportamento meccanico e chimico in un grafico come quello riportato in figura 1.6 da cui si evince che gli acciai

inoxidabili austenitici hanno una resistenza a corrosione molto elevata (inferiore solo a quella degli acciai inox duplex) ma le peggiori proprietà meccaniche, mentre è vero il contrario per gli acciai inox martensitici. Le altre classi di acciai si collocano in posizioni intermedie, come precedentemente discusso.

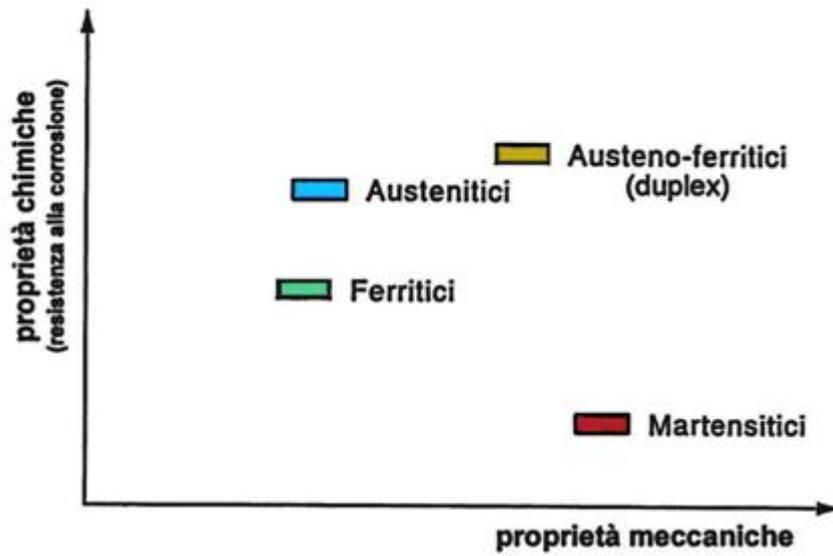


Figura 1.6 Confronto fra acciai inox in termini di resistenza a corrosione e proprietà meccaniche^[1]

Capitolo 2: Applicazione degli acciai inox in impianti a turbina e impianti nucleari

Con il passare del tempo, il settore energetico è sempre più in espansione, e richiede un numero crescente di impianti per la produzione di energia. In questo contesto, gli acciai inossidabili hanno permesso di costruire "sistemi", che riescono a sfruttare a pieno le diverse fonti di energia, idraulica, termica, nucleare, oltre alle cosiddette energie alternative (solare, eolica, geotermica, trattate nel capitolo successivo). In questa sezione verranno trattate le applicazioni legate a :

- turbine idrauliche;
- turbine a vapore;
- turbine a gas;
- impianti nucleari;

2.1 Turbine per la produzione di energia

Gli acciai inossidabili vengono applicati in vari tipi di turbine: quelle idrauliche, a vapore, a gas. In tutte queste applicazioni, gli acciai inox risultano vantaggiosi per la loro resistenza alla corrosione, abbinata a caratteristiche meccaniche soddisfacenti. I casi specifici di applicazione sono differenti: l'analisi viene iniziata a partire, dalle **turbine idrauliche**. In queste turbine, la scelta del materiale è condizionata dalla resistenza alla corrosione e dalle caratteristiche meccaniche, ma solitamente non dalla temperatura. Esse vengono costruite con componenti prodotti per colata in stampo di acciai inossidabili, in modo da poter disporre di elevate resistenze meccaniche combinate con resistenza alla corrosione per cavitazione ed erosione. I tipi di inox impiegati sono quelli al 13% di cromo con tenori di carbonio del 0.15-0.2%, mentre quando si ha a che fare con acque via via più corrosive vengono impiegati gli acciai inossidabili legati al nichel e al molibdeno. Tipico esempio di applicazione degli inox in questo settore è la centrale idroelettrica/maremotrice di La Rance (Francia), mostrata in figura 2.1, dove le condizioni di corrosione sono particolarmente severe, poichè viene sfruttato il movimento delle acque marine provocato dal fenomeno dell'alta e della bassa marea (la differenza di livello tra le due maree è di circa 11 m). Questa centrale, consta di 24 turbine Kaplan ad asse orizzontale con 4 pale mobili ciascuna. Ognuna di esse è accoppiata ad

un alternatore racchiuso in un bulbo sommerso nel condotto, attraverso al quale fluisce l'acqua di mare (figura 2.2).



Figura 2.1 Vista della centrale idroelettrica di La Rance (Francia)^[5]

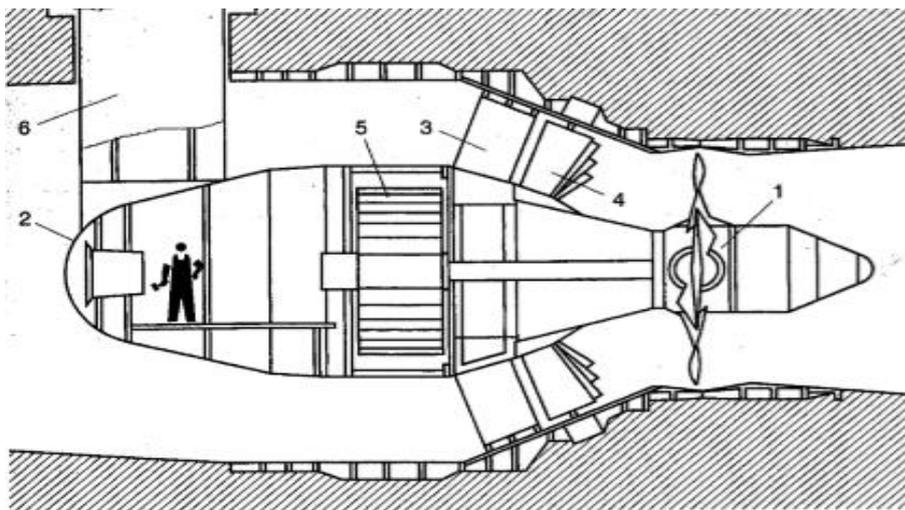


Figura 2.2 Schema di uno dei 24 gruppi turbina-alternatore della centrale maremotrice de La Rance (Francia): 1) girante orizzontale Kaplan a 4 pale; 2) struttura a guscio, contenente l'alternatore, collegata al condotto idraulico da 12 braccia fisse; 3) 12 braccia fisse; 4) 24 palette direttrici mobili; 5) alternatore; 6) accesso e uscita dei cavi^[1]

Il gruppo, rappresentato in figura 2.2, funziona grazie alla simmetria delle pale orizzontali delle giranti, sia come pompa, sia come turbina e anche come semplice orifizio in entrambi i sensi di flusso dell'acqua. In questa centrale vengono impiegati acciai inox martensitici e austenitici, legati al nichel e al molibdeno, a volte anche con aggiunta di rame. Gli acciai martensitici sono stati utilizzati per i getti di grandi dimensioni e per le parti che lavorano in acqua, sottoposte ad elevati stati di sollecitazione (indotti dalle elevate differenze di livello fra

le maree, impiegate come fonte energetica): mozzi delle giranti, cilindri dei servomotori delle pale, cono della turbina, mentre gli acciai austenitici per gli elementi saldati come: parti di giunti degli alberi, labirinti mobili e anche per le tubazioni dell'acqua marina . I risultati positivi riscontrati nell' esercizio di turbine di questo genere costruite con acciaio inossidabile, hanno portato ad una loro diffusione nella costruzione anche di giranti Francis e Kaplan a bassa prevalenza e grande portata, mentre nel campo delle turbine Pelton, l'acciaio inossidabile è stato vantaggiosamente impiegato già da tempo^[1]. Per quanto riguarda invece le **turbine a vapore**, si utilizzano acciai inossidabili sia per la costruzione di palette, sia per la costruzione di dischi e corpi. Molto utilizzati in questo settore sono gli acciai inox martensitici: AISI 403 e AISI 422. Soprattutto l'AISI 403 è molto utilizzato dai costruttori, data la sua composizione molto bilanciata che va a limitare la presenza di ferrite nella struttura. La scelta dei materiali per le palette, è legata invece alle elevate caratteristiche di resistenza meccanica a caldo e alla alta resistenza allo scorrimento viscoso, date le strette dimensioni dei giochi tra palette mobili e parti fisse. Le palette di dimensioni minori, con lama di lunghezza fra 50 e 250 mm, sono ricavate per fresatura, partendo da barre sagomate ottenute per trafilatura a caldo o per estrusione e successiva laminazione. Le palette di maggiori dimensioni, con lama di lunghezza superiore a 250 mm, sono ricavate invece per fucinatura da barre pelate di acciaio inossidabile martensitico (figura 2.3). Le palette multiple sono ricavate invece mediante asportazione di truciolo^[1].

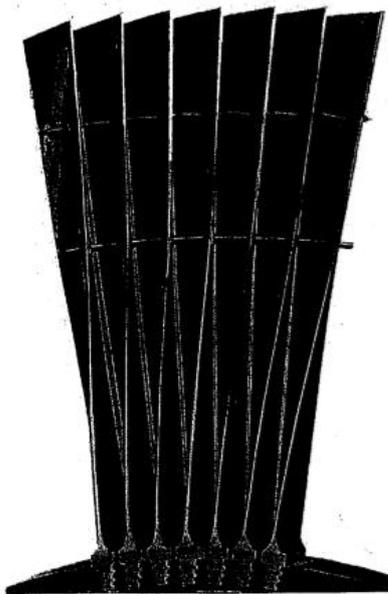


Figura 2.3 Palette di grandi dimensioni fucinate e finite per asportazione di truciolo, realizzate con acciaio inossidabile martensitico del tipo AISI 403 con addizione di 0.40-0.60 % di Mo^[1]

Le **turbine a gas** (figura 2.4), possono presentare nella loro interezza problemi di resistenza ad elevate temperature, spesso non risolvibili con acciai inossidabili, allora è necessario far ricorso a leghe a base di nichel, cobalto e cromo (dette anche "superleghe"). In questo contesto i martensitici del tipo AISI 403 sono utilizzati per la costruzione di palette statoriche e rotoriche di tutti gli stadi dei compressori assiali, salvo che per le palette direttrici d'ingresso dove, di solito, si preferisce l'AISI 316 L, per una maggiore resistenza alla corrosione. Gli alberi e i dischi del compressore invece sono ricavati da fucinati di acciai basso-legati, e le camere di combustione, la cui superficie esterna è raffreddata dall'aria di mandata del compressore assiale così da non superare temperature dell'ordine di 600-650°C, sono a volte realizzate con l' acciaio austenitico AISI 309 S, a seconda dei cicli operativi previsti per l'impianto e del tipo di combustibile usato. Per quel che riguarda gli ugelli del primo e del secondo stadio della turbina, in passato sono stati impiegati gli inox austenitici AISI 310 e 314 per il primo stadio, mentre l'AISI 304 e AISI 314 sono stati usati per il secondo. La tendenza però è quella di passare a leghe a base di cobalto-cromo-nichel-tungsteno per il primo stadio, e a leghe ferrose con cromo-nichel-cobalto-molibdeno-tungsteno per il secondo stadio. Infine per la costruzione di ruote per le turbine sono stati utilizzati per il passato acciai basso legati al cromo-molibdeno-vanadio, sostituiti però da acciai inossidabili martensitici ^[1].

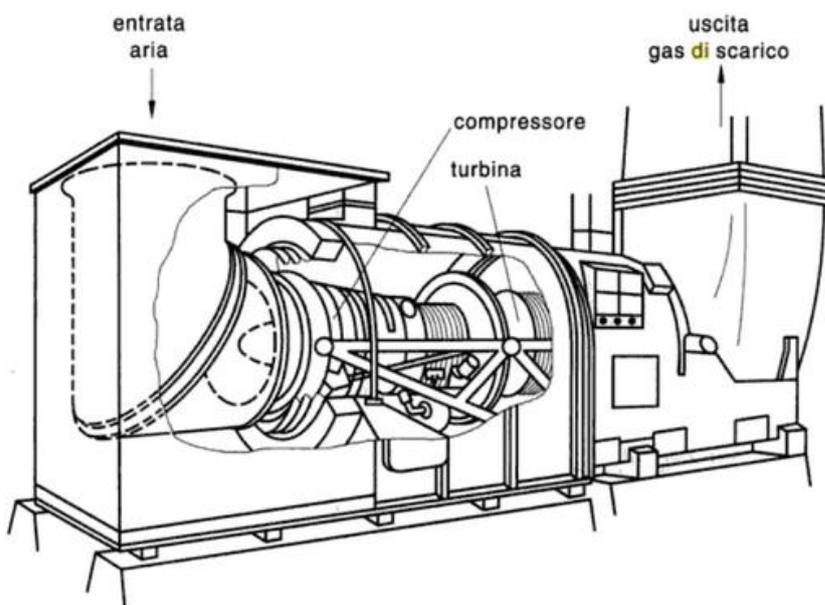


Figura 2.4 Schema di una turbina a gas di tipo industriale ^[1]

2.2 Gli impianti nucleari

Gli acciai inossidabili vengono applicati nelle centrali nucleari per la produzione di energia, grazie ad alcune loro specificità, quali:

- le loro caratteristiche di tenacità (allungamento e resilienza) non cambiano quando sottoposti ad irraggiamento neutronico prolungato;
- assenza di elevati tenori, di elementi con isotopi che restano radioattivi per lunghi periodi;
- tasso di assorbimento neutronico basso, in modo da non impedire, il flusso neutronico attorno al combustibile;
- finitura superficiale, controllabile mediante asportazione diretta delle irregolarità superficiali (dato che, per via dell'elevata resistenza a corrosione di questi acciai, si può evitare l'applicazione di rivestimenti protettivi di sovrapposizione), così da ottenere, anche su superfici interne di tubazioni, una lucidatura molto accurata, tale da facilitare il movimento dei fluidi;

Tutte queste proprietà degli inox, si sommano a quelle già note di resistenza alla corrosione, utilizzate per limitare la possibilità di fuga del materiale radioattivo dall' impianto e ridurre al minimo la probabilità di danni e interruzioni di funzionamento. Gli impianti più diffusi, sono quelli che usano come moderatore e come fluido refrigerante acqua naturale ("PWR", *Pressurized Water Reactor*) e "BWR", (*Boiling Water Reactor*), oppure acqua pesante (CANDU, *Canadian Deuterium Uranium Reactor*), nonché i reattori veloci (FBR, *Fast Breeding Reactor*). Per esempio, negli impianti PWR (figura 2.5) e BWR, il reattore è contenuto in un recipiente a pressione ad asse verticale, detto "*vessel*", realizzato con acciaio al carbonio rivestito interamente per saldatura con acciaio inossidabile austenitico. Il reattore riscalda l'acqua ad elevata pressione, essa percorre un circuito primario e perviene a un generatore di vapore, anch'esso realizzato almeno in parte con placcatura di acciaio inossidabile. In questo viene generato il vapore, che viene inviato a sua volta alle turbine, condensato e rimesso in ciclo. L'insieme del circuito primario, contenente acqua calda e in pressione e formato dal pressurizzatore, dal generatore di vapore e dalle reattive pompe, tubazioni ed accessori, è denominato "*loop*". Le centrali normalmente possono essere a 2, 3, 4 loops.

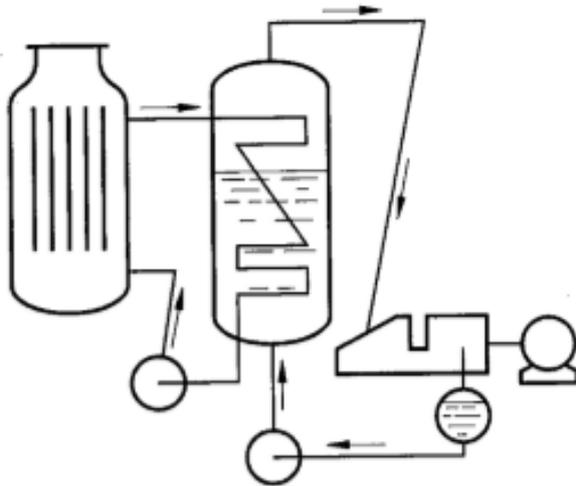


Figura 2.5 Schema di generatore nucleare di potenza ad acqua pressurizzata (PWR)^[1]

Anche nel BWR (figura 2.6) il reattore è sempre contenuto in un "vessel" ad asse verticale, realizzato con acciaio al carbonio placcato internamente per saldatura con acciaio inossidabile austenitico. L'acqua naturale è riscaldata dal reattore nel "vessel", ma a temperatura e pressioni inferiori rispetto al PWR. Il vapore così prodotto viene inviato alle turbine, successivamente condensato e rimesso in ciclo. Gli acciai inox utilizzati negli impianti BWR sono analoghi a quelli impiegati nei PWR, e la tabella 2.1 fornisce un panorama indicativo sulle loro applicazioni nelle diverse parti.

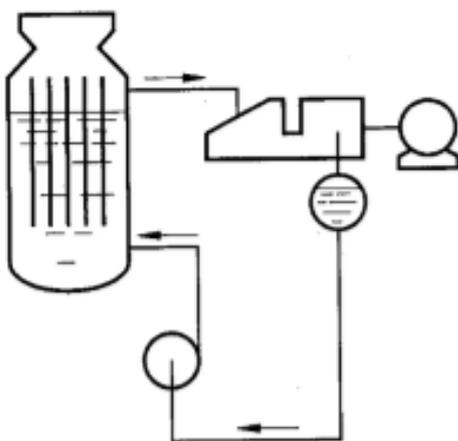


Figura 2.6 Schema di un generatore nucleare di potenza ad acqua bollente (BWR)^[1]

Tipi	Designazione		Composizione indicativa %						Settori di impiego	Legenda settori di impiego
	UNI-EN 10088		AISI	C	Cr	Ni	Mo	Altri		
	alfanumerica	numerica								
Martensitici e ferritici al solo cromo	X3CrTi17	1.4510	-	0,05 max.	17,0	-	-	Ti	3, 5, 8	1. Tubi di riempimento del combustibile. 2. Barre di controllo, lamiere al boro 3. Comandi barre controllo, valvole. 4. Recipienti a pressione del reattore, nocciolo. 5. Flange, molle, valvole, bulloni. 6. Placcature per saldatura. 7. Circuiti primari. 8. Scambiatori di calore, generatori di vapore. 9. Pompe. 10. Apparecchiature per rifornimento combustibile. 11. Piscine combustibile esausto. 12. Recipienti dissoluzione dell'eshausto. 13. Circuiti secondari. 14. Turboalternatori.
	X2CrMoTi18-2	1.4521	-	0,025 max.	17,0	-	1,8	Ti	3, 8	
	X20Cr13	1.4021	420	0,20	13,5	-	-	-	9, 14	
	X12Cr13	1.4006	410	0,010+0,15	13,0	-	-	-	3, 5, 9, 10, 14	
	X17CrNi16-2	1.4057	431	0,22	16,5	1,7	-	-	9	
	X39CrMo17-1	1.4122	-	0,38	16,5	0,5	1,2	-	5, 8, 9	
Austenitici al cromo-nichel e al cromo-nichel-molibdenu	X5CrNi18-10	1.4301	304	0,06 max.	18,0	10,0	-	-	3, 5, 8, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20	15. Anelli e barre fucinati per sed comando barre controllo, essicatori vapore, griglie nocciolo. 16. Lamiere spesse per serbatoi di moderatore. 17. Tubi guida per barre di controllo. 18. Lamiere per griglie nocciolo. 19. Barre fucinate, lamiere per separatori vapore. 20. Lamiere per serbatoi impianti purificazione acque e trattamenti acque di scarico.
	X2CrNi19-11	1.4306	304L	0,03 max.	18,0	11,0	-	-	4, 5, 7, 8, 9, 11, 12	
	X6CrNiTi18-10	1.4541	321	0,08 max.	18,0	10,5	-	Ti	3, 5, 8, 9, 10, 11	
	X6CrNiNb18-10	1.4550	347	0,08 max.	18,0	10,5	-	Nb	3, 5, 6, 8, 10, 11, 16	
	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	316	0,05 max.	17,0	11,5	2,7	-	15	
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L	0,03 max.	18,0	12,0	2,3	-	8, 9, 13	
	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	-	0,06 max.	17,5	12,5	2,3	Ti	8, 9, 13	
	X2CrNiMo18-14-3	1.4435	316L	0,03 max.	18,0	13,5	2,8	-	13	
	X6CrNiMoNb17-12-2	1.4580	-	0,06 max.	17,5	12,0	2,3	Nb	3, 8	
	-	1.4876 (1)	-	0,03	21,0	32,0	-	Ti, Al	1, 7, 8, 13, 14	
	-	-	-	0,06 max.	19,0	11,5	2,3	B	2	
	-	-	-	0,10 max.	26,0	4,8	1,5	-	16	
	-	-	304N	0,05 max.	18,5	8,5	-	N = 0,18	7, 8	
	Austenitici all'azoto	X2CrNi18-10	1.4311	-	0,03 max.	18,5	10,5	-	N = 0,18	
X2CrNiMoN17-11-2		1.4406	-	0,03 max.	17,5	12,5	2,3	N = 0,18	7, 8, 13	
X2CrNiMoN17-13-3		1.4429	316N	0,03 max.	17,5	13,5	2,7	N = 0,18	7, 8, 13, 14	
Indurenti per precipitazione	X5CrNiCuNb16-4	1.4542	-	0,05	17,0	4,0	-	Cu = 4,0; Nb	3, 5, 8, 10	
	X8CrNiMoAl15-7-2	1.4532	-	0,07	15,0	7,0	2,5	Al = 1,2	3, 5, 10	
Adatti per impieghi in temperatura	-	1.4923 (1)	-	0,22	11,5	0,5	1,0	V	14	
	-	1.4961 (1)	-	0,06	16,0	13,0	-	Nb	1, 3, 5, 8, 10	
	-	1.4919 (1)	-	0,05	17,0	13,0	2,2	-	1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10	
	-	1.4981 (1)	-	0,06	16,0	16,0	1,8	Nb	1, 3, 7, 8, 10	
	-	1.4988 (1)	-	0,06	16,0	13,0	1,3	Nb; V = 0,70 N = 0,10	14	
	-	1.4986 (1)	-	0,06	16,5	16,5	1,8	Nb; B	5, 14	
-	1.4990 (1)	-	0,05	15,0	26,0	1,3	Ti = 1,9; V; Al; B	5		

(1) Designazione secondo DIN 17007.

Tabella 2.1 Acciai inossidabili utilizzati nei diversi componenti degli impianti PWR e BWR^[1]

Negli impianti CANDU (figura 2.7), il generatore di potenza è contenuto in un recipiente cilindrico ad asse orizzontale, denominato calandria, costruito con acciaio inossidabile austenitico. Esso contiene il fluido moderatore (acqua pesante a pressione limitata e a temperatura di alcune decine di gradi), ed è attraversato da tubi, denominati "canali di potenza", nei quali è inserito il combustibile. Il fluido refrigerante, anche esso acqua pesante, è riscaldato a pressione e temperatura elevate nei canali di potenza e inviato ai generatori con opportuni circuiti. In questi generatori viene prodotto vapore scaldando acqua naturale: il vapore viene, poi successivamente inviato alle turbine, condensato e rimesso in ciclo. Gli austenitici del tipo AISI 304 L sono impiegati sia per i componenti della calandria, ma anche per quelli delle piastre di schermo. I martensitici del tipo AISI 403 vengono applicati per i prolungamenti dei tubi a pressione dei canali di potenza, per i quali è richiesta una maggiore resistenza meccanica.

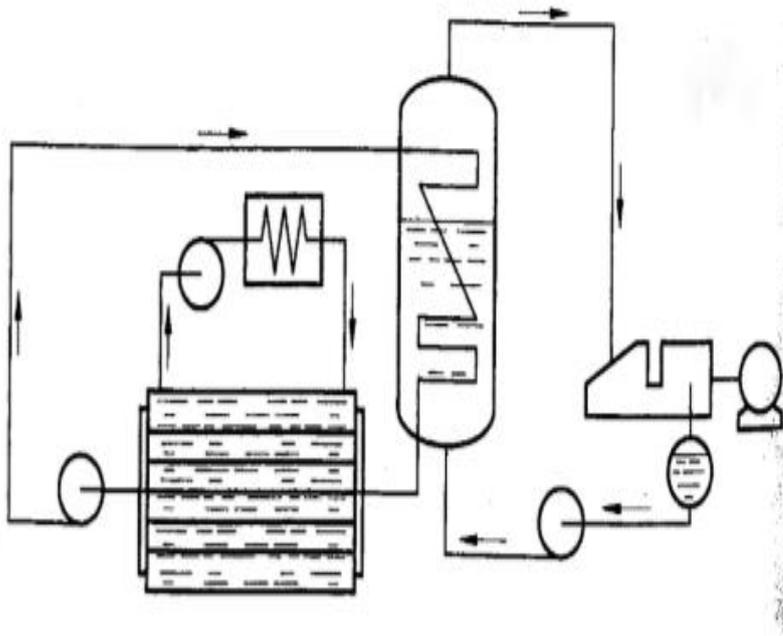


Figura 2.7 Schema di un generatore nucleare di potenza ad acqua pesante CANDU^[1]

Infine, per gli impianti FBR (figura 2.8), si farà riferimento al tipo Superphénix, dove si utilizza sodio fuso come fluido refrigerante, scelto proprio perchè sufficientemente trasparente al flusso neutronico. Questo impianto utilizza una notevole quantità di acciai inossidabili (oltre 5300 tonnellate per un impianto da 1200 MWe, rispetto alle 1100 tonnellate richieste da un impianto PWR di pari taglia) poichè il sodio fuso, pur non essendo in pressione, impone il funzionamento a temperature molto più alte di quelle raggiungibili negli impianti ad acqua naturale e ad acqua pesante. L'impianto strutturalmente comprende una caldaia ad asse verticale, di acciaio inox, che racchiude il reattore vero e proprio. Essa contiene il sodio fuso primario e circuiti di scambio primari. Il calore è trasmesso dal sodio primario al sodio secondario, che circola in quattro distinti circuiti secondari, ciascuno munito di pompe di circolazione. Il sodio secondario, attraverso altri quattro generatori di vapore, cede calore all'acqua producendo vapore che viene utilizzato per il funzionamento delle turbine, successivamente condensato e rimesso in ciclo. Gli acciai inox impiegati, sono gli austenitici al cromo-nichel del tipo AISI 304 e AISI 304 L e al cromo-nichel-molibdeno del tipo AISI 316 e 316 L, impiegati in tutto il blocco reattore, negli scambiatori intermedi, nelle pompe, nelle tubazioni sia del sodio primario che di quello secondario^[1].

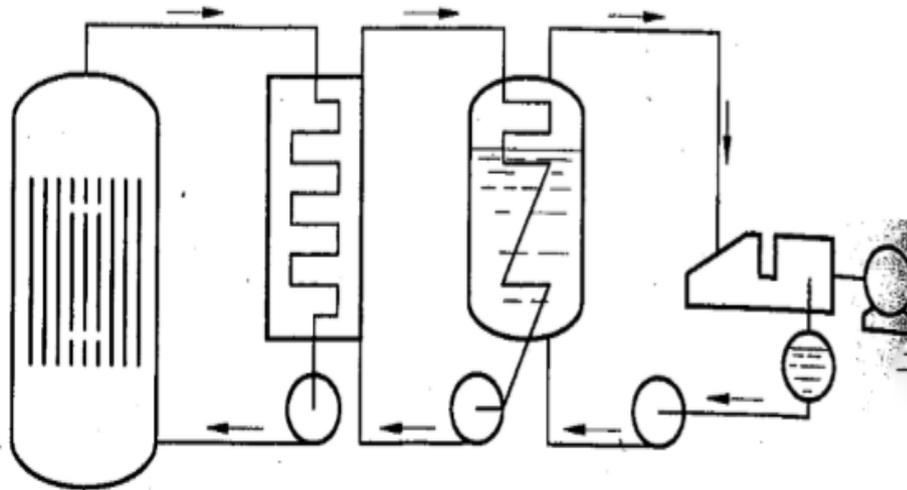


Figura 2.8 Schema di un generatore nucleare di potenza a sodio FBR^[1]

Capitolo 3: Applicazioni degli acciai inox in impianti per lo sfruttamento di energie alternative

Le fonti di energia cosiddette "alternative", sono quelle che sfruttano le energie naturali, quali: energia solare, eolica, geotermica, o quelle che recuperano le energie residue da processi produttivi, altrimenti disperse. In questo campo gli acciai inossidabili, consentendo a volte, la realizzazione stessa dei processi, oppure l'abbattimento dei costi, rendendo quindi competitiva la produzione di energia.

3.1 Solare

Negli impianti per la captazione dell' energia solare e la sua trasformazione in energia termica trovano larga applicazione gli acciai inox. Questi impianti, si possono trovare soprattutto in quelle località dove la limpidezza del cielo e l'intensità dell'irraggiamento solare consente la produzione d'acqua calda per uso sanitario o come integrazione dell'impianto di riscaldamento, realizzando grandi risparmi nel consumo di combustibile. Gli acciai inossidabili sono impiegati nella realizzazione di piastra captante, cassa contenitrice e per il serbatoio di accumulo di acqua calda. Per la realizzazione della piastra captante si usano gli austenitici AISI 304 e 304 L, (a volte AISI 316 e 316 L), ed i ferritici del tipo AISI 430 stabilizzato al titanio o al niobio oppure i ferritici a basso contenuto interstiziale (ELI) del tipo 18 Cr- 2 Mo. I ferritici del tipo 430 stabilizzati e a volte gli austenitici (es. AISI 304), sono impiegati quando nella piastra captante è fatto circolare, in circuito chiuso, un liquido termovettore primario, che a sua volta grazie ad uno scambiatore di calore, provvede al successivo riscaldamento dell'acqua. Invece, nel caso degli austenitici o dei ferritici ELI, vien fatta circolare, direttamente nella piastra captante, l'acqua da riscaldare in circuito aperto. La scelta fra i differenti tipi di acciai inossidabili è legata, ovviamente, alle caratteristiche di aggressività dell' acqua, nonché al disegno e alla realizzazione tecnologica della piastra. La cassa contenitrice invece è realizzata con lamiera piegata e saldata o rivettata di acciaio inossidabile austenitico AISI 304, oppure di acciaio ferritico AISI 430. Infine, il serbatoio di accumulo di acqua calda, si può realizzare con lamiere saldate di AISI 304. Anche i pannelli parabolici solari (figura 3.1), costituiscono, oltre ai pannelli piani, un'altra tecnica di sfruttamento dell'energia solare per produrre acqua calda a temperature dell' ordine di 85 °C . Il sistema è costituito da un pannello a forma di paraboloide, che concentra i raggi solari su un tubo posto in corrispondenza dell'asse focale del paraboloide stesso, mentre un sistema di

orientamento provvede alla sua movimentazione, così da captare i raggi del sole in modo ottimale nel suo procedere da est ad ovest. Il paraboloide è costruito con lamiera di spessore 0.7 mm di AISI 304 o AISI 316. Sono di acciaio inossidabile del medesimo tipo anche, gli accessori, quali le tubazioni, il valvolame e a volte il tubo collettore di calore^[1].

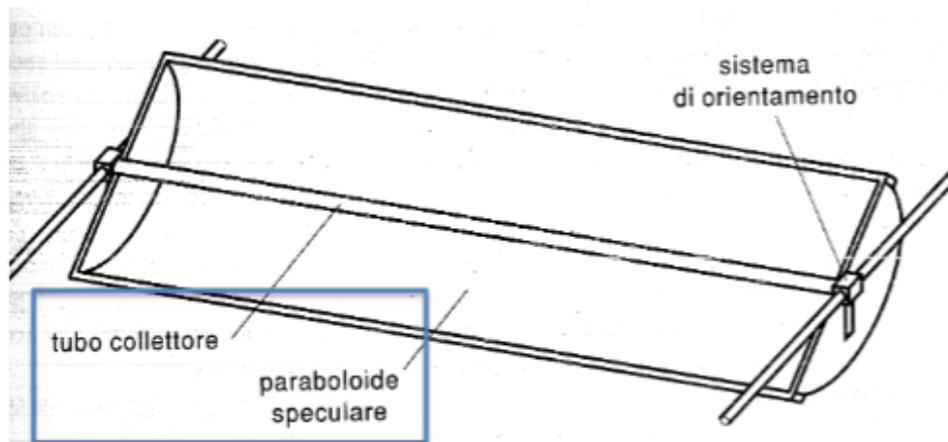


Figura 3.1 Collettore solare a concentrazione^[1]

Tra i vari tipi di pannelli solari, quelli maggiormente impiegati sono i collettori solari vetrati. In questi sistemi, la massima efficienza si raggiunge quando la radiazione solare colpisce il pannello ad angolo retto. Più l'angolo devia dai 90°, più il rendimento diminuisce, perchè proporzioni sempre più elevate delle radiazioni vengono riflesse dal vetro. La forza di questo effetto, dipende anche dalla composizione chimica e dalla superficie del vetro. Infatti, particolari vetri anti-riflesso possono ridurre in maniera significativa i riflessi indesiderati. Si ricorre all'utilizzo degli acciai inox anche come supporti per questi pannelli, grazie alla loro resistenza alla corrosione e alla loro lunga durata. Andando a realizzare qualsiasi tipo di pannelli solari, vi è sempre la necessità di un telaio resistente. A tal proposito, gli acciai inossidabili si confermano ancora una volta la scelta vincente. Infatti, andando a realizzare dei telai in acciaio inox, oltre ad un'elevata resistenza alla corrosione, vi sarà una maggiore resistenza rispetto ai cosiddetti "metalli leggeri" a carichi di neve/vento, a cui molti paesi sono soggetti durante l'anno, una bassa manutenzione ed una lunga aspettativa di vita per il telaio^[6]. Anche le centrali elettriche solari rappresentano una possibilità di utilizzare l'energia solare per la produzione di energia elettrica, ma la limitata potenza realizzabile e l'elevato di costo dell'unità di energia prodotta costituiscono il motivo della loro mancata diffusione. Esempi di

sistemi che utilizzano come fonte di energia, quella solare, sono: l'impianto di tri-generazione di Villa Pratolino a nord di Firenze (figura 3.2) e le stufe solari (figura 3.3). L'impianto di Villa Pratolino è in grado di produrre 11 kW di energia, sufficienti per poter illuminare tutti i lampioni, che guidano i visitatori nel parco, sfruttando come unica fonte di calore, l'energia solare. Anche in questo impianto si utilizzano acciai inossidabili del tipo AISI 316-316 L e AISI 303, per la loro resistenza alla corrosione e per le loro eccellenti proprietà meccaniche^[7]. Le stufe solari, invece, vengono impiegate per riscaldare o purificare l'acqua, in quei paesi dove vi è la presenza di un clima particolarmente arido con un elevato livello di radiazione solare diretta (es. Africa). Nelle stufe solari, gli acciai inossidabili vengono impiegati nella realizzazione dei coperchi, grazie alle buone proprietà riflettenti ed alla elevata durabilità in ambiente atmosferico.^[8]

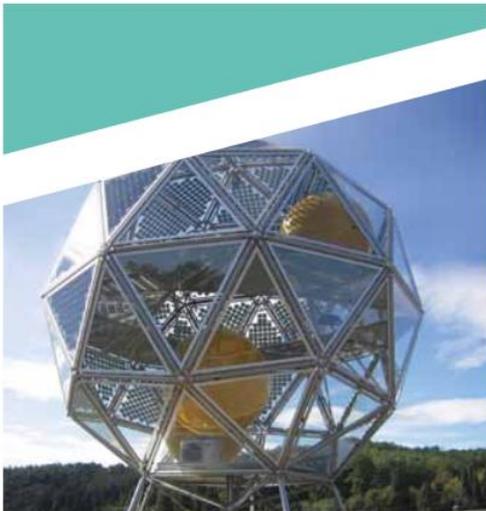


Figura 3.2 Vista dell'impianto di tri-generazione di Villa Pratolino (Firenze)^[7]



Figura 3.3 Immagine di una stufa solare^[8]

3.2 Geotermia

L'**energia geotermica** viene ricavata, sfruttando i fluidi surriscaldati in pressione prelevati dal sottosuolo e presenti in alcune aree del pianeta ad intensa attività vulcanica (in Italia ad esempio le aree geografiche maggiormente interessate sono quelle della fascia del pre-Appennino toscano). Bisogna però fare una distinzione tra i campi geografici esistenti sulla base del fluido reperito nel sottosuolo: infatti, si parla di campi a vapore dominante, dove il fluido estratto è vapore surriscaldato o di campi a liquido dominante, nei quali il fluido prodotto è costituito da una sorta di salamoia a pressione e temperature elevate. Gli impianti italiani sfruttano soprattutto i primi tipi di campi, poichè i secondi richiedono tecnologie e materiali particolari per le più severe condizioni corrosive. Tutte le centrali funzionanti in Italia sono a ciclo diretto, alcune a scarico libero come quella in figura 3.4, ed altre a condensazione.

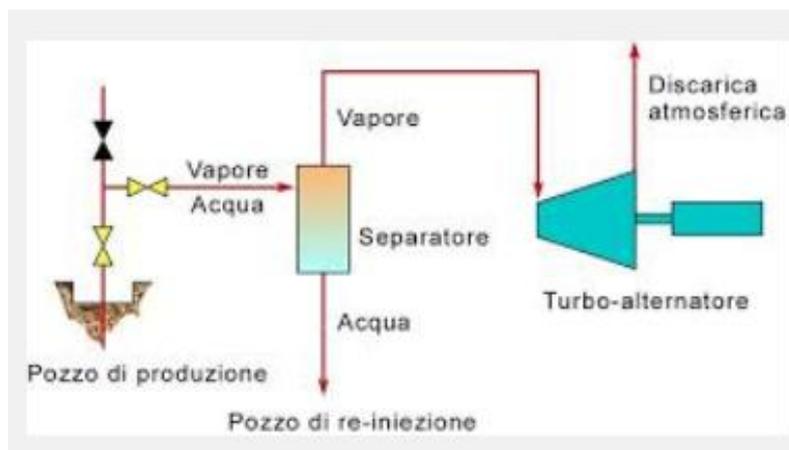


Figura 3.4 Rappresentazione schematica di un impianto geotermico a scarico libero^[14]

Nelle prime, il vapore, portato in superficie e condotto in turbina, viene scaricato direttamente in atmosfera; nelle seconde, invece, il vapore uscito dalla turbina viene inviato in un condensatore dove arriva anche l'acqua della torre di raffreddamento, che fa condensare il vapore e genera acqua che torna in ciclo alle torri. Negli impianti a condensazione vengono molto utilizzati gli acciai inossidabili, soprattutto gli austenitici al Ni-Cr-Mo (AISI 316 e AISI 316 L), per la loro resistenza a corrosione (soprattutto da agenti aggressivi tipici dell'ambiente di riferimento per questa applicazione, come cloruri, fluoruri e acido solfidrico) e per garantire

un funzionamento sicuro e lungo. Questi acciai si usano anche per condensatori, tubazioni dell'acqua, pompe di estrazione e sistema refrigerante, grazie anche al loro ottimo rapporto prestazioni/costi^[1]. Anche le pompe di calore rappresentano un sistema affidabile ed economico per riscaldare e raffreddare gli edifici, sfruttando l'energia geotermica. Le pompe di calore si possono classificare in pompe di calore ad aria e pompe di calore geotermiche. La differenza tra le due è che le prime prelevano il calore naturale presente nell'aria, mentre le seconde sfruttano il calore naturale, presente nel suolo. Tipiche applicazioni degli inox in pompe di calore, includono: scambiatori di calore (realizzati in AISI 316L), e schermi che proteggono le pompe di calore da condizioni meteo particolarmente aggressive (spesso si usa AISI 304). Un grande vantaggio dato dalle pompe di calore, è il risparmio energetico che si può ottenere: infatti, se una tecnologia del genere viene utilizzata correttamente, porterà ad un risparmio di energia del 40% in estate e del 50% in inverno^[9]. Un altro esempio di sistema che sfrutta le ottime caratteristiche degli acciai inox, è: l'impianto geotermico di Rittershoffen (figura 3.5), in Francia, che utilizzando un fluido geotermico a 165°, estratto ad una profondità di 2500 m, riesce a fornire calore ad industrie distanti fino a 15 km. Questo impianto con una produzione annua di 24 MWh, permette alle industrie servite di risparmiare 39000 tonnellate di emissioni di CO₂^[10].



Figura 3.5 Immagine dell'impianto geotermico di Rittershoffen (Francia)^[10]

3.3 Biogas

Quando si parla di **biogas**, si fa riferimento ad una miscela di gas combustibili a base di metano, ottenuta in appositi impianti dove vengono trattati liquami provenienti da allevamenti zootecnici o rifiuti organici in generale. Il biogas è ottenuto mediante processi di fermentazione anaerobica, e viene utilizzato per la produzione di energia elettrica o per usi di riscaldamento nel complesso stesso ove le sostanze trattate vengono prodotte, pervenendo così oltre ad un recupero energetico, che compensa i costi, anche alla trasformazione di tali sostanze in inerti. La digestione anaerobica, porta schematicamente a tre prodotti finali: (i) fango da disidratare e smaltire, (ii) acqua ancora inquinante da sottoporre a successive fasi operative, (iii) "biogas" costituito da 2/3 circa di metano ed il resto da altri gas, quali anidride carbonica, azoto, ammoniaca, acido solfidrico, che può essere impiegato quale risorsa energetica alternativa. L'impianto illustrato in figura 3.6, consiste in una vasca di raccolta dei liquami, in due digestori in serie e in un cogeneratore per la produzione di energia elettrica e termica. I due digestori, sono costruiti in cemento armato con isolamento in materiale plastico espanso, serviti da tubazioni realizzate con acciaio inox AISI 304. Nella realizzazione dei digestori è molto utilizzato il cemento armato, grazie ai suoi vantaggi di costo e flessibilità. In un impianto però avere una manutenzione periodica è molto importante, soprattutto per evitare fughe di gas, acqua ed odori dal digestore. Per cercare quindi di prevenire questo inconveniente, si preferisce l'utilizzo degli acciai inox anche per il digestore, poiché essi: (1) riducono i tempi e i costi di costruzione, tant'è che un digestore si può costruire in una settimana, (2) impediscono le fughe di gas e permettono una facile realizzazione dei fori, (3) alla fine della loro vita possiedono un "*scrap value*" (valore di recupero), (4) infine hanno un'eccellente resistenza alla corrosione e rendono la manutenzione dell'impianto più facile. L'AISI 304 viene impiegato anche per la realizzazione di pompe, valvole, tubi e raccordi. Viene scelto proprio questo acciaio per evitare fenomeni corrosivi, data l'aggressività del particolare ambiente ed anche perchè questo inox riesce a trasferire meglio il calore rispetto a materiali plastici^[1].

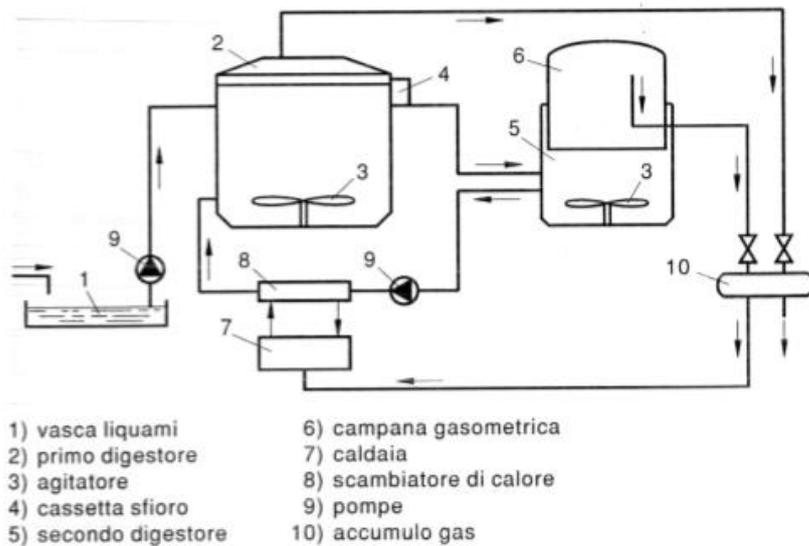


Figura 3.6 Schema di un impianto per la produzione di biogas da liquami^[1]

In genere però il biogas che viene prodotto dall'impianto contiene molte impurità, solitamente H_2S e vapore acqueo. Il problema di queste impurità è che l' H_2S è velenoso, mentre il vapore acqueo riduce l'efficienza del biogas, quando viene bruciato per produrre elettricità. Ecco quindi la necessità di installare nell'impianto un deumidificatore, in acciaio inox (AISI 316 L), per resistere agli effetti corrosivi che l'acido solfidrico può causare. Tra i molti impianti per la produzione di biogas, uno tra i più grandi al mondo, si trova in Germania, nella zona industriale di Könnern. E' un impianto che dispone di 16 digestori, ognuno di 6,3 metri di altezza e 25 metri di diametro, suddivisi in quattro moduli, ed utilizza 120.000 tonnellate di letame liquido come materia prima. Anche in questo impianto i serbatoi sono realizzati in acciai inox (AISI 304). Un altro interessante esempio lo si ha in Germania, al Frankfurt Hahn Airport (figura 3.7), dove si produce gran parte del fabbisogno di energia e di calore dalla produzione di biogas, utilizzando come materie prime, l'erba che viene tagliata nell'aeroporto, oltre al letame di provenienza animale. Utilizzando un impianto di cogenerazione a gas, si riesce a produrre contemporaneamente energia elettrica e termica. Grazie alla presenza di due digestori, si riescono a produrre 4.560 MWh di energia elettrica e 6.700 MWh di calore ogni anno. La potenza prodotta viene immessa nella rete dell'aeroporto, mentre l'energia termica è messa a disposizione di un sistema di teleriscaldamento che serve la comunità locale. Anche in questo sistema si riconferma l'utilità dell'impiego degli acciai inox, in particolare dell'AISI 304 per la produzione della parte dei digestori a contatto con il liquido, mentre l'AISI 316

(dotato di una maggiore resistenza a corrosione) viene impiegato nella parte superiore dei digestori, dove si verifica l'accumulo dei gas.



Figura 3.7 Vista esterna dell'impianto presente al Frankfurt Hahn Airport (Germania)^[11]

Dagli esempi riportati, è possibile dedurre, che gli acciai inossidabili austenitici migliorano l'affidabilità e l'efficienza degli impianti a biogas: grazie alle prestazioni che assicurano (soprattutto in termini di resistenza alla corrosione), si confermano il materiale ideale da usare nella realizzazione di questi sistemi per la produzione di energia^[11].

3.4 Fotovoltaico

Le **celle fotovoltaiche** rappresentano un'altra possibilità per lo sfruttamento dell'energia solare, presentandosi, come un dispositivo in grado di effettuare la conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica. Al giorno d'oggi esistono diverse tecnologie che permettono la realizzazione di celle fotovoltaiche. Una soluzione è quella di utilizzare celle "wafer-like", ovvero celle formate da silicio, simile a quello utilizzato nella fabbricazione dei chip per i computer. Le celle fotovoltaiche trovano soprattutto applicazione, data la loro limitata potenza, per l'alimentazione di strumentazioni e di apparecchiature per trasmissione di dati o di segnalazioni di emergenza in generale, in accoppiamento con batterie di accumulatori e per gli impianti di microgenerazione casalinga^[1]. Un tipico acciaio inox utilizzato per le sue caratteristiche di resistenza alla corrosione atmosferica, come piastra di supporto delle celle al silicio, che realizzano la conversione di energia, è l'AISI 316^[1]. Un altro sistema, in cui è possibile notare l'utilizzo delle celle fotovoltaiche è il cosiddetto "LEDtree" (figura 3.8), ovvero un lampione in acciaio inox a forma di albero, alimentato da nove pannelli solari, ideale per quelle aree che non sono collegate alla rete elettrica locale.



Figura 3.8 Immagine del sistema "LEDtree"^[12]

Ogni pannello solare è costituito da più celle fotovoltaiche, contenute all'interno di un doppio strato di vetro, in modo da essere protette dalle intemperie. Anche per questa applicazione gli acciai inox austenitici (AISI 304 e AISI 316) sono stati scelti grazie alla loro ottima resistenza alla corrosione atmosferica, ma anche per la facilità della pulizia, per le ottime caratteristiche estetiche e per la elevata riciclabilità a fine vita del componente^[12]. Un altro tipo di pannello

solare, basato sull'impiego di celle fotovoltaiche è mostrato in figura 3.9. Questo collettore, realizzato con acciaio inox ferritico (AISI 444) produce acqua calda per consumo domestico, utilizzando una pompa di ricircolo, alimentata da celle fotovoltaiche. Gli acciai inox vengono ancora una volta scelti in questo tipo di applicazione grazie alla loro resistenza alla corrosione, alla loro lunga durata e grazie anche al loro prezzo non eccessivamente elevato a paragone dei benefici che apportano^[13].



Figura 3.9 Immagine di un collettore solare che sfrutta celle fotovoltaiche^[13]

Ovviamente, anche nella progettazione di involucri edilizi, i dispositivi solari, come collettori termici e moduli fotovoltaici, vengono saldati ad un tetto, permettendo la trasformazione di quest'ultimo, in una vera e propria centrale termica o elettrica. Celle fotovoltaiche, soprattutto quelle al silicio amorfo, possono essere applicate su lamiere metalliche che vanno a ricoprire tetti. Anche questi collettori termici/moduli fotovoltaici, sono realizzati in acciaio inox (AISI 304 e AISI 316L), in modo da avere elevata resistenza alla corrosione atmosferica e garantire vantaggi da un punto di vista estetico e di durata. Applicando questi sistemi che sfruttano l'energia solare, per far sì che tutto l'impianto funzioni correttamente e in modo sicuro, è utile realizzare anche gli elementi di fissaggio in acciai inox, in modo da poter sfruttare le proprietà meccaniche e la resistenza alla corrosione, senza perdere quindi l'affidabilità di tutto l'impianto. Gli inox più impiegati per gli elementi di fissaggio sono l'AISI 304 e AISI 316, anche se ultimamente sono stati sostituiti dagli acciai duplex (figura 3.10), che hanno una resistenza meccanica più elevata rispetto agli austenitici. Con il passare del tempo, sempre più paesi stanno aggiornando i loro codici di costruzione relativi a pannelli solari ed elementi di fissaggio, poichè in molte parti del mondo fenomeni meteorologici come tempeste, piogge

torrenziali e bufere di neve stanno aumentando, quindi vi è sempre più la necessità di utilizzare acciai in grado di superare anche questi ostacoli^[6].



Figura 3.10 Elementi di fissaggio in acciai duplex per pannelli solari^[6]

Capitolo 4: CONCLUSIONI

Dall'analisi di diversi sistemi per la produzione di energia, si evince come l'impiego degli acciai inossidabili, comporti diversi vantaggi nella realizzazione di alcuni componenti. Tra i diversi aspetti positivi degli acciai inox, quelli più ricorrenti nei diversi impianti, sono: l'elevata resistenza alla corrosione combinata con proprietà meccaniche adeguate, cui consegue una buona durabilità e quindi una minore richiesta di interventi di manutenzione, le ottime caratteristiche estetiche ed un rapporto costi/benefici interessante. Grazie a tutte queste caratteristiche, gli acciai inox trovano un'ampia gamma di applicazioni in sistemi per la produzione di energia, tant'è che molti paesi in tutto il mondo ne stanno facendo grande uso, in modo da poter ottenere impianti più sicuri, durevoli ed affidabili, grazie alle prestazioni che questi acciai possono garantire.

Capitolo 5: APPENDICE 1

Type	UNS Number	Composition - Percent *							Other
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	
405	S40500	0.08	1.00	1.00	11.5-14.5		0.04	0.03	0.10-0.30 Al
409	S40900	0.08	1.00	1.00	10.5-11.75		0.045	0.045	6 x %C min. Ti
429	S42900	0.12	1.00	1.00	14.0-16.0		0.04	0.03	
430	S43000	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0		0.04	0.03	
430F**	S43020	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0		0.06	0.15 min.	0.06 Mo
430FSe**	S43023	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0		0.06	0.06	0.15 min. Se
430Ti	S43036	0.10	1.00	1.00	16.0-19.5	0.75	0.04	0.03	5 x %C - Ti min.
434	S43400	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0		0.04	0.03	0.75-1.25 Mo
436	S43600	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0		0.04	0.03	0.75-1.25 Mo; 5 x %C min. Nb(Cb) + Ta
442	S44200	0.20	1.00	1.00	18.0-23.0		0.04	0.03	
444	S44400	0.025	1.00	1.00	17.5-19.5	1.00	0.04	0.03	1.75-2.5 Mo, 0.035 N 0.2 + 4 (%C + %N); (Ti + Nb(Cb))
446	S44600	0.20	1.50	1.00	23.0-27.0		0.04	0.03	0.25 N
18-2FM**	S18200	0.08	2.50	1.00	17.5-19.5		0.04	0.15 min.	
18SR		0.04	0.3	1.00	18.0				2.0 Al; 0.4 Ti
26-1 (E-Brite)	S44625	0.01	0.40	0.40	25.0-27.5	0.50	0.02	0.02	0.75-1.5 Mo; 0.015N; 0.2 Cu; 0.5 (Ni+Cu)
26-1Ti	S44626	0.06	0.75	0.75	25.0-27.0	0.5	0.04	0.02	0.75-1.5 Mo; 0.04 N; 0.2 Cu; 0.2-1.0 Ti
29-4	S44700	0.01	0.30	0.20	28.0-30.0	0.15	0.025	0.02	3.5-4.2 Mo
29-4-2	S44800	0.01	0.30	0.20	28.0-30.0	2.0-2.5	0.025	0.02	3.5-4.2 Mo
Monit	S44635	0.25	1.00	0.75	24.5-26.0	3.5-4.5	0.04	0.03	3.5-4.5 Mo; 0.3-0.6 (Ti + Nb(Cb))
Sea-cure/ Sc-1	S44660	0.025	1.00	0.75	25.0-27.0	1.5-3.5	0.04	0.03	2.5-3.5 Mo; 0.2 + 4 (%C + %N) (Ti + Nb(Cb))

*Single values are maximum values.

**These grades are generally considered to be unweldable.

Tabella 5.1 Composizioni nominali delle varie classi di acciai inox ferritici^[15]

Type	UNS Number	Composition - Percent *							Other
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	
403	S40300	0.15	1.00	0.50	11.5-13.0		0.04	0.03	
410	S41000	0.15	1.00	1.00	11.5-13.0		0.04	0.03	
410Cb	S41040	0.18	1.00	1.00	11.5-13.5		0.04	0.03	0.05-0.3 Nb(Cb)
410S	S41008	0.08	1.00	1.00	11.5-13.5	0.6	0.04	0.03	
414	S41400	0.15	1.00	1.00	11.5-13.5	1.25-2.50	0.04	0.03	
414L		0.06	0.50	0.15	12.5-13.0	2.5-3.0	0.04	0.03	0.5 Mo; 0.03 Al
416	S41600	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0		0.04	0.03	0.6 Mo
416Se**	S41623	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0		0.06	0.06	0.15 min. Se
416 Plus X**	S41610	0.15	1.5-2.5	1.00	12.0-14.0		0.06	0.15 min.	0.6 Mo
420	S42000	0.15 min.	1.00	1.00	12.0-14.0		0.04	0.03	
420F**	S42020	0.15 min.	1.25	1.00	12.0-14.0		0.06	0.15 min.	0.6 Mo
422	S42200	0.20-0.25	1.00	0.75	11.0-13.0	0.5-1.0	0.025	0.025	0.75-1.25 Mo; 0.75-1.25 W; 0.15-0.3 V
431	S43100	0.20	1.00	1.00	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03	
440A	S44002	0.60-0.75	1.00	1.00	16.0-18.0		0.04	0.03	0.75 Mo
440B	S44003	0.75-0.95	1.00	1.00	16.0-18.0		0.04	0.03	0.75 Mo
440C	S44004	0.95-1.20	1.00	1.00	16.0-18.0		0.04	0.03	0.75 Mo

*Single values are maximum values.

**These grades are generally considered to be unweldable.

Tabella 5.2 Composizioni nominali delle varie classi di acciai inox martensitici¹⁵¹

Type	UNS Number	Composition - Percent *							ASTM A GRADE	Other
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S		
Precipitation-Hardening Types										
PH 13-8 Mo	S13800	0.05	0.10	0.10	12.25-13.25	7.5-8.5	0.01	0.008		2.0-2.5 Mo; 0.90-1.35 Al; 0.01 N
15-5 PH	S15500	0.07	1.00	1.00	14.0-15.5	3.5-5.5	0.04	0.03		2.5-4.5 Cu; 0.15-0.45 Nb(Cb) + Ta
17-4 PH	S17400	0.07	1.00	1.00	15.5-17.5	3.0-5.0	0.04	0.03	630	3.0-5.0 Cu; 0.15-0.45 Nb(Cb) + Ta
17-7 PH	S17700	0.09	1.00	1.00	16.0-18.0	6.5-7.75	0.04	0.03	631	0.75-1.15 Al
PH 15-7 Mo	S15700	0.09	1.00	1.00	14.0-16.0	6.5-7.75	0.04	0.03		2.0-3.0 Mo; 0.75-1.5 Al
17-10 P		0.07	0.75	0.50	17.0	10.5	0.28			
A286	S66286	0.08	2.00	1.00	13.5-16.0	24.0-27.0	0.040	0.030	660	1.0-1.5 Mo; 2 Ti; 0.3 V
AM350	S35000	0.07-0.11	0.5-1.25	0.50	16.0-17.0	4.0-5.0	0.04	0.03		2.5-3.25 Mo; 0.07-0.13 N
AM355	S35500	0.10-0.15	0.5-1.25	0.50	15.0-16.0	4.0-5.0	0.04	0.03		2.5-3.25 Mo
AM363		0.04	0.15	0.05	11.0	4.0				0.25 Ti
Custom 450	S45000	0.05	1.00	1.00	14.0-16.0	5.0-7.0	0.03	0.03		1.25-1.75 Cu; 0.5-1.0 Mo 8 x %C - Nb(Cb)
Custom 455	S45500	0.05	0.50	0.50	11.0-12.5	7.5-9.5	0.04	0.03		0.5 Mo; 1.5-2.5 Cu; 0.8-1.4 Ti; 0.1-0.5 Nb(Cb)
Stainless W	S17600	0.08	1.00	1.00	16.0-17.5	6.0-7.5	0.04	0.03		0.4 Al; 0.4-1.2 Ti
Duplex Types										
2205	S32205	0.03	2.0	1.0	22.0	5.5	0.03	0.02		3.0 Mo; 0.18 N
2304	S32304	0.03	2.5	1.0	23.0	4.0				0.1 N
255		0.04	1.5	1.0	25.5	5.5				3.0 Mo; 0.17 N; 2.0 Cu
NU744LN		0.067	1.7	0.44	21.6	4.9				2.4 Mo; 0.10 N; 0.2 Cu
2507	S32750	0.03	1.2	0.8	25	5.5	0.035	0.020		4 Mo; 0.28 N

*Single values are maximum values.

Tabella 5.3 Composizioni nominali delle varie classi di acciai duplex^[15]

Type	UNS Number	Composition - Percent *							Other
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	
201	S20100	0.15	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25 N
202	S20200	0.15	7.5-10.0	1.00	17.0-19.0	4.0-6.0	0.06	0.03	0.25 N
205	S20500	0.12-0.25	14.0-15.5	1.00	16.5-18.0	1.0-1.75	0.06	0.03	0.32-0.40 N
216	S21600	0.08	7.5-9.0	1.00	17.5-22.0	5.0-7.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo; 0.25-0.5 N
301	S30100	0.15	2.00	1.00	16.0-18.0	6.0-8.0	0.045	0.03	
302	S30200	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	
302B	S30215	0.15	2.00	2.0-3.0	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	
303**	S30300	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.15 min.	0.6 Mo
303Se**	S30323	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.06	0.15 min. Se
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	
304H	S30409	0.04-0.10	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	
304L	S30403	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	
304LN	S30453	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.15 N
S30430	S30430	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Cu
304N	S30451	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.16 N
304HN	S30452	0.04-0.10	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.16 N
305	S30500	0.12	2.00	1.00	17.0-19.0	10.5-13.0	0.045	0.03	
308	S30800	0.08	2.00	1.00	19.0-21.0	10.0-12.0	0.045	0.03	
308L		0.03	2.00	1.00	19.0-21.0	10.0-12.0	0.045	0.03	
309	S30900	0.20	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	
309S	S30908	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	
309S Cb	S30940	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	8 x %C - Nb(Cb)
309 Cb + Ta		0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	8 x %C (Nb(Cb) + Ta)
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	
310S	S31008	0.08	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	
312		0.15	2.00	1.00	30.0 nom.	9.0 nom.	0.045	0.03	
254SMo	S31254	0.020	1.00	0.80	19.5-20.5	17.50-18.5	0.03	0.010	6.00-6.50Mo; 0.18-0.22N; Cu=0.5-1.00
314	S31400	0.25	2.00	1.5-3.0	23.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316F**	S31620	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.20	0.10 min.	1.75-2.5 Mo
316H	S31609	0.04-0.10	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316L	S31603	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316LN	S31653	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo; 0.10-0.30 N
316N	S31651	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo; 0.10-0.16 N
317	S31700	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
317L	S31703	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
317M	S31725	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	12.0-16.0	0.045	0.03	4.0-5.0 Mo
321	S32100	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 x %C min. Ti
321H	S32109	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 x %C min. Ti
329	S32900	0.10	2.00	1.00	25.0-30.0	3.0-6.0	0.045	0.03	1.0-2.0 Mo
330	N08330	0.08	2.00	0.75-1.5	17.0-20.0	34.0-37.0	0.04	0.03	
AL6-XN	NB0367	0.030	2.00	1.00	20.0-22.0	23.5-25.5	0.04	0.03	6.00-7.00Mo; 0.18-0.25N; Cu=0.75
330HC		0.40	1.50	1.25	19.0 nom.	35.0 nom.			
332		0.04	1.00	0.50	21.5 nom.	32.0 nom.	0.045	0.03	
347	S34700	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	10 x %C min. Nb(Cb) + Ta
347H	S34709	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	10 x %C min. Nb(Cb) + Ta
348	S34800	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.2 Cu; 10 x %C min. Nb(Cb) + Ta(c)
348H	S34809	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.2 Cu; 10 x %C min. Nb(Cb) + Ta
384	S38400	0.08	2.00	1.00	15.0-17.0	17.0-19.0	0.045	0.03	
Nitronic 32	S24100	0.10	12.0	0.50	18.0	1.6			0.35 N
Nitronic 33	S24000	0.06	13.0	0.5	18.0	3.0			0.30 N
Nitronic 40	S21900	0.08	8.0-10.0	1.00	18.0-20.0	5.0-7.0	0.06	0.03	0.15-0.40 N
Nitronic 50	S20910	0.06	4.0-6.0	1.00	20.5-23.5	11.5-13.5	0.04	0.03	1.5-3.0 Mo; 0.2-0.4 N; 0.1-0.3 Cb; 0.1-0.3 V
Nitronic 60	S21800	0.10	7.0-9.0	3.5-4.5	16.0-18.0	8.0-9.0	0.04	0.03	1.5-3.0 Mo; 0.2-0.4 N;

*Single values are maximum values.

Tabella 5.4 Composizioni nominali di alcune classi di acciai inox austenitici

Property	Austenitic Types	Ferritic Types	Martensitic Types	Precipitation Hardening Types
Elastic Modulus; 10 ⁶ psi GPa	28.3 195	29.0 200	29.0 200	29.0 200
Density; lb./in. ³ g/cm ³	0.29 8.0	0.28 7.8	0.28 7.8	0.28 7.8
Coeff. of Therm. Expansion: $\mu\text{in./in. } ^\circ\text{F}$ $\mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$	9.2 16.6	5.8 10.4	5.7 10.3	6.0 10.8
Thermal Conduct.; Btu/hrft. $^\circ\text{F}$ w/mk	9.1 15.7	14.5 25.1	14.0 24.2	12.9 22.3
Specific Heat; Btu/lb. $^\circ\text{F}$ J/k $^\circ\text{K}$	0.12 500	0.11 460	0.11 460	0.11 460
Electrical Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	74	61	61	80
Magnetic Permeability	1.02	600-1,100	700-1000	95
Melting Range $^\circ\text{F}$ $^\circ\text{C}$	2,500-2,650 1,375-1,450	2,600-2,790 1,425-1,530	2,600-2,790 1,425-1,530	2,560-2,625 1,400-1,440

Tabella 5.5 Proprietà fisiche dei vari gruppi di acciai inox^[15]

Type	Condition	Tensile Strength		0.2% Yield Strength		Elong. %	R.A. %	Hardness Rockwell
		Ksi	MPa	Ksi	MPa			
405	Anneal	70	480	40	275	30	60	B80
409	Anneal	65	450	35	240	25		B75M
429	Anneal	71	490	45	310	30	65	B88M
430	Anneal	75	515	45	310	30	60	B82
430F	Anneal	80	550	55	380	25	60	B86
430Ti	Anneal	75	515	45	310	30	65	
434	Anneal	77	530	53	365	23		B83M
436	Anneal	77	530	53	365	23		B83M
442	Anneal	80	550	45	310	25	50	B85
444	Anneal	60	415	40	275	20		B95M
446	Anneal	80	550	50	345	23	50	B86
26-1EBrite	Anneal	65	450	40	275	22		B90M
26-1Ti	Anneal	68	470	45	310	20		B95M
29-4	Anneal	80	550	60	415	20		B98M
29-4-2	Anneal	80	550	60	415	20		B98M
18SR	Anneal	90	620	65	450	25		B90
Monit	Anneal	94	650	80	550	20		B100M
Sea-cure/SC-1	Anneal	80	550	55	380	20		B100M

M = Maximum

Tabella 5.6 Proprietà meccaniche delle varie classi di acciai inox ferritici^[15]

Type	Condition	Tensile Strength		0.2% Yield Strength		Elong.	R.A.	Hardness
		Ksi	MPa	Ksi	MPa	%	%	Rockwell
201	Anneal	115	793	55	379	55		B90
201	Full Hard	185	1275	140	965	4		C41
202	Anneal	105	724	55	379	55		B90
301	Anneal	110	758	40	276	60		B85
301	Full Hard	185	1275	140	965	8		C41
302	Anneal	90	620	37	255	55	65	B82
302B	Anneal	95	655	40	276	50	65	B85
303	Anneal	90	620	35	241	50	55	B84
304	Anneal	85	586	35	241	55	65	B80
304L	Anneal	80	552	30	207	55	65	B76
304N	Anneal	85	586	35	241	30		
304LN	Anneal	80	552	30	207			
305	Anneal	85	586	37	255	55	70	B82
308	Anneal	85	586	35	241	55	65	B80
308L	Anneal	80	551	30	207	55	65	B76
309	Anneal	90	620	40	276	45	65	B85
310	Anneal	95	655	40	276	45	65	B87
312	Anneal	95	655			20		
314	Anneal	100	689	50	345	45	60	B87
316	Anneal	85	586	35	241	55	70	B80
316L	Anneal	78	538	30	207	55	65	B76
316F	Anneal	85	586	35	241	55	70	B80
317	Anneal	90	620	40	276	50	55	B85
317L	Anneal	85	586	35	241	50	55	B80
321	Anneal	87	599	35	241	55	65	B80
347/348	Anneal	92	634	35	241	50	65	B84
329	Anneal	105	724	80	552	25	50	B98
330	Anneal	80	550	35	241	30		B80
330HC	Anneal	85	586	42	290	45	65	
332	Anneal	80	552	35	241	45	70	
384	Anneal	80	550					

Tabella 5.7 Proprietà meccaniche delle varie classi di acciai inox austenitici^[15]

Type	Condition	Tensile Strength		0.2% Yield Strength		Elong. %	R.A. %	Hardness Rockwell
		Ksi	MPa	Ksi	MPa			
Precipitation Hardening Types								
Ph13-8 Mo	H950	220	1517	205	1413	8	45	C45
15-5PH	H900	190	1310	170	1172	10	35	C44
15-5PH	H1150	135	931	105	724	16	50	C32
17-4PH	Sol. Ann.	150	1034	110	758	10	45	C33
17-4PH	H900	200	1379	178	1227	12	48	C44
177PH	Sol. Ann.	130	896	40	276	35		B85
177PH	RH950	235	1620	220	1517	6		C48
PH15-7 Mo	Sol. Ann.	130	896	55	379	35		B88
PH15-7 Mo	RH950	240	1655	225	1551	6	25	C48
1710P	Sol. Ann.	89	613	37	255	70	76	B82
1710P	H1300	143	986	98	676	20	32	C32
A286	H1350	130	896	85	586	15		
AM350	Sol. Ann.	160	1103	55	379	40		B95
AM350	DA	195	1344	155	1069	10.5		C41
AM355	Sol. Ann.	175	1207	65	448	30		B95
AM355	DA	195	1344	155	1069	10		C41
Custom 450	Anneal	125	862	95	655	10	40	C30
Custom 450	H900	180	1241	170	1172	10	40	C40
Custom 455	H900	235	1620	220	1517	8	30	C47
Stainless W	Sol. Ann.	120	827	75	517	7		C30
Stainless W	H950	195	1344	180	1241	7	25	C46
Duplex Types								
2205		120	827	65	448	25		
2304		110	758	60	414	25		
255		110	758	80	552	15		
2507		116	800	80	550	15		

Tabella 5.8 Proprietà meccaniche delle varie classi di acciai inox duplex^[15]

Type	Condition	Tensile Strength		0.2% Yield Strength		Elong. %	R.A. %	Hardness Rockwell
		Ksi	MPa	Ksi	MPa			
403	Anneal	75	517	40	276	30	65	B82
403	*Temp. 800°F	195	1344	150	1034	17	55	C41
410	Anneal	75	517	40	276	30	65	B82
410	*Temp. 800°F	195	1344	150	1034	17	55	C41
410S	Anneal	60	414	30	207	22		B95M
410Cb	Anneal	70	483	40	276	13	45	
410Cb	*Temp. (Int.)	125	862	100	689	13	45	
414	Anneal	120	827	95	655	17	55	C22
414	*Temp. 800°F	200	1379	150	1034	16	58	C43
414L	Anneal	115	793	80	552	20	60	
416 Plus X	Anneal	75	517	40	276	30	60	
420	Anneal	95	655	50	345	25	55	B92
420	*Temp. 600°F	230	1586	195	1344	8	25	C50
422	Temp., Int.	140	965	110	758	13	30	
431	Anneal	125	862	95	655	20	60	C24
431	*Temp. 800°F	205	1413	155	1069	15	60	C43
440A	Anneal	105	724	60	414	20	45	B95
440A	*Temp. 600°F	260	1793	240	1655	5	20	C51
440B	Anneal	107	738	62	427	18	35	B96
440B	*Temp. 600°F	280	1931	270	1862	3	15	C55
440C	Anneal	110	758	65	448	13	25	B97
440C	*Temp. 600°F	285	1965	275	1896	2	10	C57

*Tempered after austenitizing and cooling to room temperature.

M = Maximum (600°F = 315°C)

Int. = Intermediate temper hot finished (800°F = 427°C)

Tabella 5.9 Proprietà meccaniche delle varie classi di acciai inox martensitici^[15]

Type Stainless Austenitic	Atmospheric				Fresh Water	Salt Water	Soil	Chemical
	Industrial	Marine	City	Rural				
201	5	2	1	1	1		3	7
202	5	2	1	1	1		3	7
205	5	2	1	1	1		3	7
301	5	2	1	1	1		3	7
302	5	2	1	1	1		3	7
302B	5	2	1	1	1		3	7
303	5	2	1	1	1		3	7
303Se	5	2	1	1	1		3	7
304	5	2	1	1	1	3	3	7
304H	5	2	1	1	1	3	3	7
304L	5	2	1	1	1	3	3	7
304N	5	2	1	1	1	3	3	7
305	5	2	1	1	1		3	7
308	5	2	1	1	1		3	7
309	5	2	1	1	1	3	3	7
309S	5	2	1	1	1	3	3	7
310	5	2	1	1	1	3	3	7
310S	5	2	1	1	1	3	3	7
314	5	2	1	1	1			7
316	3	1	1	1	1	3	1	7
316F	3	1	1	1	1	3	1	7
316H	3	1	1	1	1	3	1	7
316L	3	1	1	1	1	3	1	7
316N	3	1	1	1	1	3	1	7
317	3	1	1	1	1	3	1	7
317L	3	1	1	1	1	3	1	7
321	5	2	1	1	1	3	3	7
321H	5	2	1	1	1	3	3	7
329	3	2	1	1	1	1	3	7
330	3	1	1	1	1		3	7
347	5	2	1	1	1	3	3	7
347H	5	2	1	1	1	3	3	7
348	5	2	1	1	1	3	3	7
348H	5	2	1	1	1	3	3	7
384		2	1	1	1		3	7
Ferritic Types								
405	6	4	2	1	3	6	6	7
409	6	4	2	1	3	6	6	7
429	3	4	2	1	1	6	6	7
430	3	4	1	1	1	6	6	7
430F	3	4	1	1	1	6	6	7
430FSe	3	4	1	1	1	6	6	7
434	3	4	1	1	1			7
436	3	4	1	1	1			7
442	3	2	1	1	1			7
446	3	2	1	1	1	3		7
Martensitic Types								
403	6	4	2	1	3	6	6	7
410	6	4	2	1	3	6	6	7
414	6	4	2	1	3	6	6	7
416	6	4	2	1	3	6	6	7
416Se	6	4	2	1	3	6	6	7
420	6	4	2	1	3	6	6	7

Tabella 5.10 Resistenza alla corrosione delle varie categorie di acciai inox in diversi ambienti^[15]

Capitolo 6: RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] G. Di Caprio, "Gli Acciai Inossidabili. Cenni di Metallurgia", (2003) Ulrico Hoepli, Milano.
- [2] Dispense Prof. C. Martini, "Metallurgia T", Corso di Laurea in Ingegneria Energetica, Università di Bologna, AA 2014-2015.
- [3] R. Askeland, P. Phulé, "The Science and Engineering of Materials" (2006) Thomson, Composizioni e proprietà tipiche degli acciai inox designati secondo norma AISI
- [4] A. Cigada, T. Pastore, "Struttura e proprietà dei materiali metallici" (2012) McGraw-Hill.
- [5]https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/63/Rance_tidal_power_plant.JPG/220px-Rance_tidal_power_plant.JPG
- [6] ISSF (International Stainless Steel Forum), Stainless Steel in Solar Energy Use, 11/5/2012, pg 2-21.
- [7] ISSF (International Stainless Steel Forum), Tri-generation Solar Power Plant, October 2012.
- [8] ISSF (International Stainless Steel Forum), Stainless Steel and Solar Energy in Building Applications, February 2009.
- [9] The Heat Under Your Feet, Geothermal heat pumps for heating and cooling, May 2015 (<http://www.heatunderyourfeet.eu>).
- [10] Alexandra Latham, A world first for Geothermal: Deep EGS heat plant for industrial use inaugurated, June 2016 (<http://egec.info/a-world-first-for-geothermal-deep-egs-heat-plant-for-industrial-use-inaugurated/>).
- [11] ISSF (International Stainless Steel Forum), Stainless Steel in Biogas Production, 2/10/2012.
- [12] ISSF (International Stainless Steel Forum), Solar LED Street Lighting, 5/10/2012.
- [13] ISSF (International Stainless Steel Forum), Integrated Solar Collector, 5/10/2012.
- [14] <http://www.energiarinnova.com/settori/geotermia2.gif>.

[15] D. Kotecki, F.Armao, "Stainless Steels Properties - How to weld them, where to use them", (2003) The Lincoln Electric Company.

RINGRAZIAMENTI

Volevo ringraziare prima di tutto la mia famiglia: i miei genitori, che in questi anni sono stati sempre al mio fianco supportandomi dal punto di vista morale ed economico, permettendo la realizzazione di questo splendido percorso, fatto sia di ostacoli ma al tempo stesso di grandi soddisfazioni. Oltre ai miei genitori, un enorme ringraziamento va ai miei fratelli Pasquale e Luca, ed a Francesca, la mia ragazza. Sono state queste le persone che dal primo anno di università fino ad oggi mi hanno sempre incoraggiato e mi hanno dato la forza di non mollare mai, soprattutto nei momenti difficili, aiutandomi a guardare sempre avanti, puntando dritto all'obbiettivo che dovevo raggiungere e che ho raggiunto con enorme soddisfazione.

Ringrazio tutti i miei familiari: zii, nonni, cugini, parenti, ed amici, ma voglio anche ringraziare chi dall'alto, anche se non fisicamente presente, è stato sempre vicino a me e non mi ha mai fatto sentire la sua mancanza, trasmettendomi la forza e la determinazione per andare sempre avanti.

Colgo l'occasione anche per ringraziare la Prof.ssa Carla Martini, per l'opportunità che mi ha dato nell'intraprendere questo bellissimo percorso di tesi, dimostrandosi sempre professionale, disponibile e gentile nei miei confronti.

.