



Caratterizzazione di leghe d'oro in 9,10, 14 e 18ct

Abstract

La conoscenza delle proprietà delle leghe d'oro permette di ottenere delle preziose informazioni per la scelta della composizione più adatta al particolare processo produttivo applicato. Chiaramente, nel caso di leghe d'oro, il colore gioca un ruolo fondamentale nella scelta della composizione utilizzabile, ma comunque piccole aggiunte di alcuni elementi possono aiutare a migliorare alcune caratteristiche importanti nel ciclo produttivo utilizzato. Partendo da queste considerazioni si è deciso di determinare le proprietà chimiche e fisiche di numerose leghe d'oro in 9,10,14 e 18ct.

Lo scopo del presente lavoro è quello di correlare le caratteristiche di ogni lega con la sua composizione chimica in modo tale da scegliere la lega d'oro che presenti la migliore soluzione per le diverse applicazioni pratiche. Per raggiungere lo scopo prefissato si è dovuto fare anche uno sforzo di messa a punto di metodi di indagine delle proprietà delle leghe preziose (o meglio di perfezionamento di metodi già esistenti in altri settori) che permettano di ottenere i dati necessari tenendo presente che comunque si sta lavorando con un materiale molto costoso.

Introduzione

In tutti i settori industriali risulta molto importante lo studio delle proprietà dei materiali così da consentire la scelta del materiale adatto per ogni applicazione pratica (oltre che un miglioramento dei processi produttivi applicati). In particolare modo a noi interessa studiare le proprietà delle leghe d'oro (e argento) adatte alla gioielleria.

Abbiamo pertanto deciso di mettere a punto delle metodologie di indagine che permettano di ottenere informazioni sul comportamento di leghe metalliche (a base oro e/o argento) in modo tale da riuscire a utilizzare la giusta composizione

in funzione della lavorazione applicata. Chiaramente ci siamo concentrati sulla determinazione delle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche dei materiali in esame ma abbiamo già in previsione di sviluppare prove di carattere tecnologico per valutare le proprietà per particolari applicazioni (come ad esempio la resistenza a corrosione durante i processi di vuotatura).

In sintesi lo scopo di questo lavoro è la caratterizzazione di leghe d'oro in 9, 10, 14 e 18ct e la successiva analisi dei dati così che si possa, in funzione delle caratteristiche richieste, scegliere la composizione più idonea.

Entrando nello specifico del lavoro si sottolinea come nella pratica quotidiana esista una suddivisione delle leghe preziose in funzione della caratura e del colore ma che non esiste una classificazione in funzione delle proprietà o delle caratteristiche meccaniche delle leghe utilizzate in gioielleria. Questo lavoro si prefigge l'ambizioso scopo di creare un manuale delle proprietà delle leghe preziose in modo tale da riuscire a scegliere la lega più adatta in funzione del ciclo produttivo applicato. Ovviamente bisognerà implementare sistematicamente il manuale con nuovi dati (nuove leghe) così da riuscire nel tempo ad avere le informazioni per un sempre maggiore numero di combinazioni di composizioni. Bisogna aggiungere che molto spesso il criterio di scelta di una lega in gioielleria è il colore finale (e non le caratteristiche tecniche) ma almeno con dei dati in possesso si è in grado di dire se una determinata composizione può dare buoni risultati oppure se necessita di particolari accorgimenti (quali potrebbero essere delle minori deformazioni applicate) per raggiungere l'oggetto finale. Si ritiene che con dei dati numerici ottenuti da delle procedure (dunque dati oggettivi comparabili tra loro), si possano confrontare varie leghe tra loro individuando quale possa dare il miglior compromesso tra specifiche richieste e ciclo produttivo applicato.

Abbiamo diviso la nostra ricerca in tre parti. La prima parte ha riguardato lo studio e la messa a punto delle metodiche necessarie per la determinazione delle caratteristiche ricercate. La seconda parte invece ha riguardato la raccolta e l'analisi dei dati ricercati (proprietà chimiche e fisiche) di ogni lega. La terza parte riguarda la definizione dei parametri maggiormente sensibili alla lavorazione applicata in modo tale da individuare immediatamente quale lega è più idonea al processo utilizzato (o addirittura riuscire a stilare una graduatoria di leghe per ogni lavorazione). In questo lavoro presenteremo solo la prima e parte della seconda parte, nello specifico la prima parte verrà illustrata nel dettaglio con una descrizione completa, mentre nella seconda parte si presenteranno solo le leghe in 18 ct. Le composizioni analizzate sono riferite tutte ad articoli in gamma (commercializzati dalla nostra azienda), ma chiaramente non si farà riferimento al codice commerciale e si denominerà ogni composizione con una sigla anonima visto il carattere scientifico del lavoro. Sottolineiamo altresì che tutte le metodiche di caratterizzazione sviluppate prendono come riferimento normative europee o metodiche ASTM applicate in altri settori industriali (specialmente nell'ambito dell'acciaio).

Attualmente, escluso il colore e la caratura, nel gergo quotidiano si dividono le leghe secondo due grandi macroprocessi produttivi:

1. leghe adatte alla produzione in microfusione;
2. leghe adatte alla produzione in deformazione plastica.

Con lo scopo di rendere più chiara l'esposizione si è seguita questa suddivisione anche nel testo.

In generale (ma non è sempre valido) la principale differenza tra le 2 categorie di leghe è che nel primo caso sono leghe che contengono degli elementi disossidanti specifici mentre nel secondo caso non contengono elementi disossidanti. Tutte possono avere degli affinatori del grano cristallino.

Le composizioni analizzate sono leghe quaternarie con piccole aggiunte di vari elementi che danno particolari proprietà e caratteristiche. Abbiamo diviso anche le composizioni secondo due grandi famiglie:

1. la prima famiglia la chiameremo leghe d'oro colorato e presenta una base quaternaria di Au-Ag-Cu-Zn con appunto piccole aggiunte di determinati elementi. L'abbiamo definita come oro colorato perché le tonalità di colore ottenibile va dal rosso intenso al verde (naturalmente passando per il giallo)
2. la seconda famiglia la chiameremo leghe d'oro bianco e presenta una base quaternaria di Au-Ni-Cu-Zn con, anche in questo caso, piccole aggiunte di determinati elementi. L'abbiamo definita come oro bianco in quanto il colore ottenibile presenta

delle differenti sfumature della tonalità bianca (o se si vuole diverse scale di grigio).

I dati ottenuti verranno presentati seguendo questo schema.

Metodica di caratterizzazione

Di seguito viene fornita una descrizione del processo di caratterizzazione messo a punto.

Viene eseguita una prefusione per ogni composizione (800g per leghe 18ct, 700 g per le leghe 14ct, 600 g per le leghe in 9 e 10 ct). Si utilizza un forno ad induzione a sistema aperto utilizzando un crogiolo in grafite e si cola in staffa (si utilizza un sistema aperto in modo tale da permettere anche un mescolamento meccanico e dunque una maggiore omogeneità). La temperatura di colata utilizzata dipende dalla caratura e dal colore (abbiamo stimato delle temperature di colata per la prefusione dividendo le leghe in macrogruppi in funzione della composizione). Il metallo è protetto attraverso l'utilizzo di un gas inerte insufflato all'interno del crogiolo sia durante la fusione che durante la colata. Si procede quindi con la laminazione e il taglio in vari pezzi della lega ottenuta per la successiva fusione in una fonditrice ad atmosfera controllata a camera chiusa. Si esegue una analisi DTA sul campione dopo prefusione, in modo tale da utilizzare nella fonditrice chiusa una temperatura di colata di 100°C maggiore del liquidus rilevato.

Per ogni composizione possono essere effettuate 5 fusioni nella fonditrice chiusa (utilizzando il materiale proveniente dalla prefusione) in modo tale da ottenere i lingotti o i campioni microfusi per le successive prove di caratterizzazione. Nel dettaglio si effettuano le seguenti fusioni:

1. colata in staffa a sezione rettangolare 20x8 mm per ottenere la curva di incrudimento e le medaglie per prove densità e prova colore (e cessione nichel). Fusione eseguita per tutte le composizioni;
2. colata in staffa a sezione rettangolare 70x5 mm per ottenere il lingotto che poi servirà per avere i campioni per la prova di imbutitura. Fusione eseguita per le composizioni adatte al processo di deformazione plastica;
3. colata in staffa la sezione quadrata 6x6 mm per avere il lingotto necessario per tirare il filo per prova trazione su deformato. Fusione eseguita solo per le composizioni adatte al processo di deformazione plastica
4. un cilindro con 16 campioni per le prove di durezza e la determinazione della dimensione media del grano (medaglie 24x12 mm con spessore 4 mm). Fusione eseguita per tutte le composizioni.
5. un cilindro con 30 campioni di trazione per microfusione. Fusione eseguita solo per le composizioni adatte al processo di microfusione.

Il forno fusorio chiuso è costituito da due camere comunicanti tra di loro dove in quella inferiore è posizionata la staffa o il cilindro e in quella superiore viene fuso il materiale e la colata avviene tramite alzata di uno stopper che tiene chiuso un foro sul fondo del crogiolo.

Le staffe vengono scaldate precedentemente in forno a 320°C. Le staffe presentano delle dimensioni tali da poterle inserire nella macchina fusoria ad atmosfera controllata. Vengono inserite dopo aver caricato il metallo solido prima di chiudere la macchina e far partire il ciclo di fusione (si utilizza un programma semiautomatico). Si è deciso di operare con queste modalità in modo da colare in staffa tutte le leghe allo stesso modo ed eliminare gli eventuali errori dovuti alla manualità dell'operatore. Una volta effettuata la colata in staffa per tutte le leghe si apre velocemente la macchina e si procede con il raffreddamento immediato in acqua del lingotto ottenuto.

Il cilindro con le medaglie viene mantenuto a 600°C e il cilindro con i campioni di trazione a 700°C (per non avere problemi di riempimento), e anche questi vengono inseriti nella macchina fusoria prima di chiuderla ed iniziare il ciclo. Una volta colato il materiale nei cilindri quest'ultimi vengono raffreddati (spenti in acqua) dopo 6 minuti se contengono degli affinatori del grano, altrimenti, in caso contengano solo elementi disossidanti, dopo 20 minuti.

Il lingotto largo 20mm e di spessore 8 mm subisce una serie di riduzioni in modo tale da determinare la curva di incrudimento della lega in esame. In particolare si rileva la durezza dopo fusione (spessore 8mm), dopo riduzione del 40% (spessore 5mm), dopo riduzione del 60% (spessore 3mm), dopo riduzione del 80% (spessore 1,5mm), dopo riduzione del 90% (spessore 0,8mm). Allo spessore di 1,5mm vengono stampati 10 campioni 16x8 mm per la prova di densità (5 campioni), prova del colore (2 campioni) e per essere ricotte (3 campioni). Sui campioni ricotti si determinerà la durezza. La curva di incrudimento viene determinata solo per le leghe adatte al processo di deformazione, mentre per le leghe per microfusione si deforma direttamente da 8 mm a 1,5mm e si tranciano i vari campioni.

Per le leghe contenenti nichel, una volta raggiunto lo spessore di 2 mm si divide a metà la lastra e una parte viene ricotta. Si raggiungono successivamente i 0,5mm e si tranciano 3 dischetti per la prova cessione nichel (dischi del diametro di 12mm, spessore 0,5 mm e con un foro centrale del diametro di 1mm) seguendo le istruzioni per l'ottenimento del materiale di riferimento della UNI EN 1811.

Il lingotto largo 70 mm e dello spessore di 5 mm si riduce a 2 mm e si ricuocce. Si esegue una ulteriore laminazione fino allo spessore di 0,4 mm e si tagliano 5 fogli da 70x70 mm. Anche questi si ricuociono secondo i parametri scelti e quindi si sottopongono alla prova di imbutitura.

Il lingotto quadro 6x6 mm si riduce al laminaio fino ad ottenere un filo quadro 1x1 mm per le prove di trazione. I passaggi applicati sono i seguenti: laminazione da 6x6 a 4x4 (riduzione del 55%) seguita da una ricottura; laminazione da 4x4 a 2x2 (riduzione del 75%) e relativa ricottura; laminazione da 2x2 a 1x1 (riduzione del 75%) e ricottura finale. Il filo così ottenuto viene sottoposto alla prova di trazione. Si esegue la trazione sul filo solo per le leghe adatte al processo di deformazione plastica.

I parametri di ricottura applicati variano solo in funzione della composizione secondo la tabella seguente:

Caratura	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Raffreddamento
9, 10, 14ct bianco	725	18	Rapido in olio
18 ct bianco	700	18	Rapido in olio
9, 10, 14ct colorato	675	18	Rapido in acqua
18ct colorato	650	18	Rapido in acqua

Tabella 1 - Parametri per trattamenti termici di ricottura

Tutte le ricotture vengono eseguite in un forno statico (da laboratorio) con atmosfera riducente.

Il cilindro con le medaglie 24x12x4 mm viene prodotto per determinare le durezze dopo fusione e dopo vari trattamenti termici. La durezza viene eseguita sulle medaglie opportunamente trattate termicamente, secondo la seguente:

- 1 medaglia dopo fusione tal quale;
- 1 medaglia dopo solubilizzazione;
- 9 medaglie dopo indurimento a diverse temperature e per diversi tempi.

Per quanto riguarda i parametri di solubilizzazione (temperatura, tempo) dipendono dalla composizione secondo la tabella seguente:

Caratura	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Raffreddamento
9, 10 e 14ct bianco	750	30	Rapido in olio
18ct bianco	725	30	Rapido in olio

9, 10, e 14ct colorato	700	30	Rapido in acqua
18ct colorato	675	30	Rapido in acqua

Tabella 2 - Parametri per trattamento termico di solubilizzazione

Gli indurimenti invece sono eseguiti su tutte le leghe (indipendentemente dalle composizioni) alle temperature di 250, 300 e 350°C con tempi di permanenza in forno (ad ogni temperatura) di 60, 120 e 180 minuti (quindi per un totale di 9 medaglie indurite). Le medaglie una volta tolte dal forno sono raffreddate velocemente in acqua. Si deve sottolineare che tutte le medaglie prima di essere indurite vengono solubilizzate secondo le temperature di tabella 2.

Si è deciso di verificare l'aumento di durezza previo idoneo trattamento termico su una medaglia microfusa e non deformata in quando risulta essere più pratico e veloce e ad ogni modo anche se probabilmente non permette di valutare la massima durezza raggiungibile, garantisce la possibilità di verificare con precisione quale leghe siano indurenti. I dati dopo indurimento sono comunque paragonabili tra loro (è possibile lo stesso effettuare una "classifica" comparativa tra le leghe più indurenti).

Il cilindro con i provini di trazione per microfusione viene prodotto solo per le leghe adatte ai processi di microfusione. Il provino di trazione presenta un diametro di 2 mm e un tratto utile di 12 mm (L0). In figura1 è illustrato il provino di trazione utilizzato:

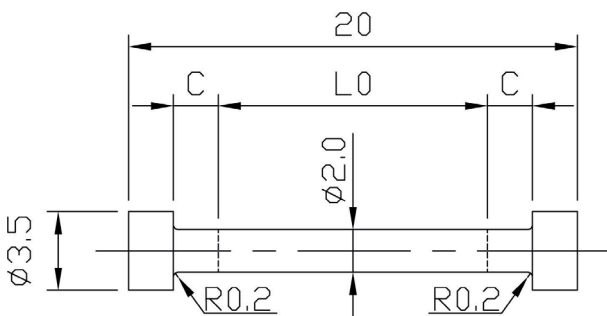


Figura 1 - Provino trazione

Una volta ottenuti i vari campioni si procede con la raccolta dati attraverso le prove che descriveremo di seguito. Ad ogni prova corrisponde una normativa europea oppure una metodica ASTM per cui non ci dilungheremo nella loro spiegazione.

Prova DTA

La prova DTA (Analisi Termica Differenziale) viene eseguita allo scopo di ottenere le temperatura

di solidus e liquidus vale a dire l'intervallo di fusione della lega presa in esame. Si utilizza un campione di 25 mg (schiacciato). Si sottolinea che si esegue una DTA dopo prefusione per avere la temperatura di colata nel sistema chiuso ed una seconda DTA da un campione prelevato dopo la prima fusione in staffa nella fonditrice chiusa per avere la conferma del dato riscontrato (dopo la seconda fusione si ha maggiore omogeneità).

Prova Densità

La densità di campioni viene determinata utilizzando il principio di Archimede, un solido immerso in un liquido è sottoposto ad una spinta idrostatica il cui valore è uguale al peso del liquido spostato dal volume del campione.

Si utilizza la seguente formula il calcolo della densità:

$$d = w(a) * d(fl) [w(a) - w(fl)]$$

dove:

d = densità del corpo solido

d(fl) = densità del liquido

w(a) = peso del corpo solido in aria

w(fl) = peso del corpo solido nel liquido

I campioni da sottoporre alla prova sono le medaglie (5) incrudite 16x8mm.

Prova Imbutitura

In questa prova viene individuato il valore di imbutibilità del materiale stimando l'altezza raggiunta dal punzone nel momento in cui avviene la rottura del campione (lama 70x70 di spessore 0,4mm). Il dato ottenuto risulta molto importante nella produzione di stampato.

Per imbutitura si intende la misura, espressa in mm, che indica l'altezza dell'impronta lasciata da un penetratore sul lamierino al termine della prova. Il penetratore, costituito da una sfera in acciaio del diametro di 20mm, viene spinto progressivamente contro il lamierino, finché l'operatore non ravvisa la formazione della prima cricca. La lama è bloccata da un dispositivo atto al serraggio del lamierino, in modo da prevenirne lo scorrimento durante la prova. Sostanzialmente si tratta del metodo Erichsen, il riferimento è il documento ASTM E643-84.

Prova Trazione

I parametri che vengono ricavati sono la resistenza a trazione, la resistenza a snervamento, la deformazione a rottura. I primi due sono parametri legati alla resistenza, l'ultimo alla duttilità

del materiale.

Il carico unitario di rottura alla trazione (R_m) è un valore caratteristico del materiale definito come il rapporto tra il carico massimo applicato e la sezione iniziale del provino (ossia prima dell'applicazione del carico). In particolare il carico di rottura rappresenta la massima sollecitazione monoassiale che un materiale può sostenere prima di arrivare a rottura.

Il carico di snervamento ($R_{s(0,1)}$) è definito come il valore della tensione in corrispondenza della quale il materiale inizia a deformarsi plasticamente, passando da un comportamento elastico reversibile ad un comportamento plastico caratterizzato dallo sviluppo di deformazioni irreversibili che non cessano al venir meno della causa sollecitante. Nel presente lavoro è stato preso in considerazione il carico di snervamento allo 0,1%.

La deformazione a rottura, normalmente chiamata elongazione, viene indicata con A ed è la lunghezza del provino dopo rottura, espressa come percentuale delle dimensioni iniziali.

La prova di trazione viene eseguita su due diverse tipologie dei campioni, in funzione che si analizzi una lega adatta ai processi di microfusione oppure di deformazione plastica.

Per composizioni adatte alla microfusione si utilizzano i campioni provenienti dal cilindro appositamente fuso. Questi, essendo ottenuti direttamente da microfusione, devono essere opportunamente controllati al momento della realizzazione dell'alberino al fine di limitare il più possibile le prove nulle (è di fondamentale importanza che non presentino difetti visivi e che siano perfettamente in asse). Se la rottura, durante la prova di trazione, avviene fuori dal tratto utile (L_0) la prova viene scartata in quanto si ritiene che la concentrazione degli sforzi in corrispondenza della variazione di sezione abbia alterato la prova stessa. Per essere ritenuta valida la prova si devono ottenere almeno 15 valori di trazione (il dato risulta essere la media delle prove effettuate). Anche il sistema di afferraggio è stata approfonditamente studiato in modo da limitare al massimo giochi e l'errato posizionamento del campione.

Per le composizioni adatte alla deformazione plastica si è utilizzato il filo a sezione quadra 1x1mm e tratto utile di 200mm. Questi campioni devono trovarsi allo stato laminato e ricotto, si deve prestare la massima attenzione che non sia presenti difetti visivi sulla superficie del filo. Si utilizza un sistema di afferraggio pneumatico con parziale avvolgimento del filo. La prova per essere valida deve presentare una rottura tra i morsetti di aggancio, e anche in questo caso si devono avere un minimo di 15 prove, su cui si fa la media.

Il documento a cui si fa riferimento per l'analisi è ASTM E8-00.

Per le composizioni adatte sia ai processi di microfusione che di deformazione plastica è stata eseguita la prova di trazione sia sui campioni microfusi che deformati.

Prova Durezza

Lo scopo della prova è quello di determinare la durezza del materiale in esame in diverse condizioni fisiche (dopo fusione, incrudito, ricotto, solubilizzato, indurito). Si è utilizzata la scala Vickers applicando un carico di 500 gf per 15 secondi.

I documenti di riferimento sono ASTM E92-82 e ASTM E384-99.

Si sono determinate le durezze sui campioni dopo i seguenti stati fisici:

1. Stato incrudito: dopo fusione; dopo riduzione del 40%; dopo riduzione del 60%; dopo riduzione del 80%; dopo riduzione del 90%. Durezze eseguite solo per le composizioni adatte per la deformazione.
2. Stato ricotto: dopo riduzione dell'80% e successiva ricottura secondo parametri tabella 1.
3. Dopo trattamento termico: su medaglia microfusa tal quale; su medaglia solubilizzata; su 9 medaglie indurite con parametri differenti (temperatura, tempo).

Prova della Dimensione Grano

La dimensione media del grano viene determinata seguendo la procedura planimetrica (o di Jeffries), che implica un effettivo conteggio del numero di grani all'interno di una determinata area.

Per eseguire la determinazione delle dimensioni del grano occorre sottoporre i campioni (medaglia microfusa accuratamente lucidata) ad un attacco metallografico con soluzioni a base di cianuri, e successivamente contare i grani messi in evidenza. Si fa riferimento al documento ASTM E112-96.

Si è deciso di determinare la dimensione del grano solo sui campioni microfusi e non anche su quelli ricotti (indipendentemente se si tratta di leghe per microfusione o deformazione).

Prova Colore

Con questa prova si determinano le coordinate colore riferite allo spazio CIELab da misure di riflettanza direttamente eseguite su campioni appositamente preparati per tale scopo (medaglie incrudite 16x8 mm lappate). Lo spettro di riflettanza o trasmittanza di un campione viene sottoposto ad elaborazioni matematiche computazionali (vedi documento di riferimento ASTM E308-99) per ottenere le coordinate colorimetriche CIELab (L^* , a^* e b^*), vale a dire per ogni composizione si

individua un unico punto nello spazio tridimensionale del colore.

Analisi della Cessione Nichel

Lo scopo del test è quello di simulare il rilascio di nichel da articoli che vengono in contatto diretto e prolungato con la pelle. Si segue esattamente quanto prescritto dalla normativa UNI EN 1811. I campioni di cessione della varie leghe presentano la geometria dei campioni di riferimento di suddetta normativa. La concentrazione del nichel disciolto nella soluzione, alla fine del periodo previsto, viene determinata attraverso spettroscopia al plasma (ICP-OES). Il rilascio di nichel è infine espresso in mg/cm2/settimana e si considera il valore corretto.

Si è determinato il valore di cessione nichel solo sulle leghe che nella loro composizione presentano del nichel, vale a dire nelle leghe d'oro bianche.

Analisi Dati

Una volta messa a punto la procedura per ogni prova di caratterizzazione si è passati alla raccolta dei dati per tutte le leghe in gamma nella nostra produzione. Mettiamo in evidenza che ci sono leghe "universali" vale a dire adatte sia al processo di microfusione che deformazione e che per queste leghe sono stati affettuate tutte le prove previste (sia di deformazione che di microfusione).

Iniziamo a presentare i dati relativi alle leghe d'oro colorato 18ct.

Leghe d'oro colorato 18ct

Abbiamo analizzato 34 leghe. Come si nota dalla tabella 3 sono state ordinate in funzione del contenuto di argento (e in secondo luogo del contenuto di zinco). Nella tabella 3, GR1 corrisponde ad un affinatore 1 mentre GR2 corrisponde ad un affinatore 2.

Campione	Au	Ag	Zn	Cu	GR1	GR2	Disossidanti
Lega 1	750	3,75	3,75	Bal- ance	X		
Lega 2	750	8,75	8,75	Bal- ance	X		
Lega 3	750	10	7,5	Bal- ance		X	
Lega 4	750	25	5	Bal- ance	X		
Lega 5	750	25	7,5	Bal- ance		X	
Lega 6	750	42,5	11,25	Bal- ance	X		

Lega 7	750	45	2,5	Bal- ance	X		
Lega 8	750	45	2,5	Bal- ance		X	
Lega 9	750	45	12,5	Bal- ance		X	
Lega 10	750	72,5	7,5	Bal- ance			X
Lega 11	750	75	62,5	Bal- ance		X	
Lega 12	750	75	62,5	Bal- ance			X
Lega 13	750	77,5	26,25	Bal- ance		X	
Lega 14	750	80	5	Bal- ance		X	
Lega 15	750	110,5	4,75	Bal- ance		X	
Lega 16	750	112,5	25	Bal- ance		X	
Lega 17	750	115	8,75	Bal- ance			X
Lega 18	750	117,5	5	Bal- ance	X		
Lega 19	750	117,5	5	Bal- ance		X	
Lega 20	750	117,5	5	Bal- ance			X
Lega 21	750	118,75	28,75	Bal- ance		X	
Lega 22	750	120,5	20,5	Bal- ance			X
Lega 23	750	121,5	9	Bal- ance		X	
Lega 24	750	123	8,75	Bal- ance			X
Lega 25	750	125	26	Bal- ance			X
Lega 26	750	137,5	17,5	Bal- ance		X	
Lega 27	750	141,25	8,75	Bal- ance		X	
Lega 28	750	141,25	8,75	Bal- ance			X
Lega 29	750	143	8	Bal- ance			X
Lega 30	750	150	11,25	Bal- ance	X		
Lega 31	750	155	3,75	Bal- ance		X	
Lega 32	750	160	8,75	Bal- ance		X	
Lega 33	750	160	8,75	Bal- ance			X
Lega 34	750	190	3,75	Bal- ance	X		

Tabella 3 - Leghe d'oro colorato 18ct analizzate

Per prima cosa si è analizzato l'andamento della temperatura del liquidus e del solidus. Nel seg-

uente grafico si riportano i valori rilevati per tutte le 34 leghe.

Con il triangolo verso l'alto si sono identificati i valori del liquidus delle leghe, con il quadrato il valore del solidus. La curva continua superiore è relativa all'interpolazione dei valori del liquidus escludendo le leghe con contenuto di zinco superiore al 12,5%, vale a dire si sono esclusi i valori delle leghe 11, 12, 13, 16, 21, 22, 25 e 26 (interpolazione su 24 punti). Chiaramente, come ci si aspettava all'aumentare del contenuto di zinco si ha una riduzione della temperatura di liquidus, ma questo non è stato preso in considerazione (per il momento). Interessante notare come all'aumentare del contenuto di argento prima la temperatura del liquidus presenti una riduzione per poi crescere nuovamente.

La seconda curva continua (quella inferiore del grafico) rappresenta l'interpolazione dei valori del solidus ottenuti escludendo come prima le leghe 11, 12, 13, 16, 21, 22, 25 e 26. Anche in questo caso la curva diminuisce all'aumentare del contenuto di argento fino ad un certo valore per poi crescere nuovamente.

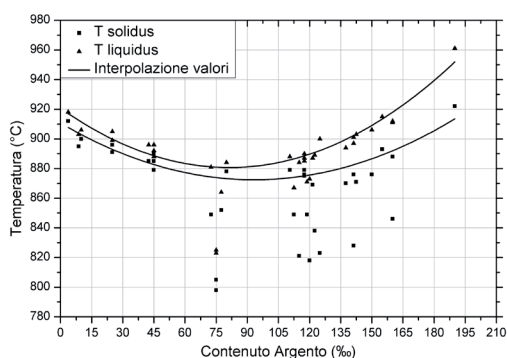


Figura 2 - Andamento della temperatura di solidus e liquidus in funzione del contenuto di argento

Da notare che la differenza tra l'interpolazione del liquidus ed il solidus cresce all'aumentare del contenuto di argento. Si può notare maggiormente questo nel seguente grafico dove si riporta l'intervallo di fusione (inteso come differenza tra liquidus e solidus) al variare del contenuto di argento.

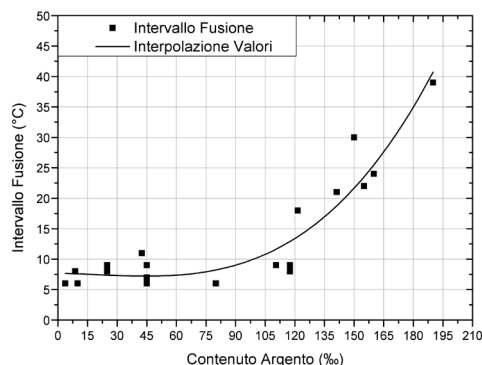


Figura 3 - Andamento dell'intervallo di fusione in funzione del contenuto di argento

In questo grafico sono state considerate solo le composizioni con un contenuto di zinco massimo di 12,5%. Inoltre non si sono considerate le composizioni con elementi disossidanti in quanto elementi quali il silicio tendono ad incrementare l'intervallo di fusione. Si ritiene pertanto che pur avendo eliminato un considerevole numero di leghe in generale all'aumentare dell'argento l'intervallo di fusione si allarghi.

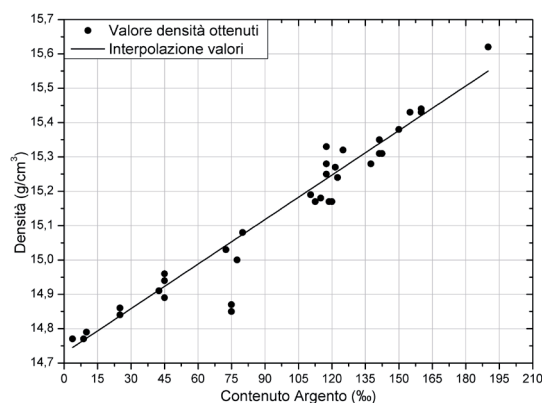


Figura 4 - Andamento della densità in funzione del contenuto di argento

Passando ad analizzare l'andamento della densità (figura 4) si nota come si abbia una crescita in funzione del contenuto di argento. Anche in questo caso la retta interpolata è stata ottenuta non considerando le composizioni con un contenuto di zinco superiore 12,5%, a dimostrazione che l'elemento che maggiormente in uisce sulla densità risulta essere l'argento. Lo zinco in uisce comunque sulla densità.

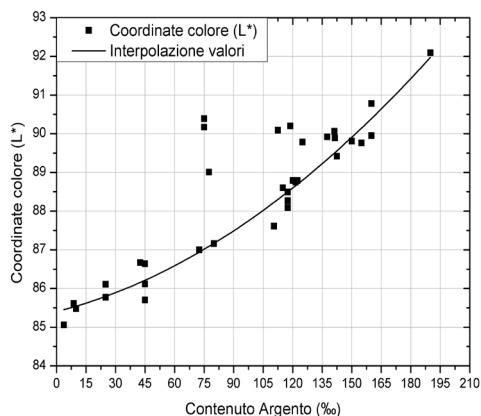


Figura 5 - Andamento di L^* in funzione del contenuto di argento

Per quanto riguarda le coordinate del colore L^* , l'andamento ottenuto è quello della figura 5. Anche in questo caso l'interpolazione è stata eseguita togliendo le leghe con un contenuto di zinco superiore a 12,5%. L'andamento di L^* in funzione del contenuto di argento è quello rappresentato dalla curva continua; si nota come si abbia una tendenza alla crescita di L^* al crescere dell'argento. Risulta inoltre (anche se si hanno pochi dati a disposizione) che all'aumentare del contenuto di zinco si ha un aumento di L^* . Sembra che piccole aggiunte di affinatori o disossidanti non vada a modificare sensibilmente il valore di L^* .

Per quanto riguarda il valore di a^* (figura 6) si ha invece che all'aumentare del contenuto di argento il colore passa dal rosso verso il verde (si ricorda che a^* rappresenta la "dimensione del colore" che va dal rosso al verde). Anche in questo caso l'interpolazione (linea continua) è stata eseguita escludendo le leghe con zinco superiore ai 12,5%.

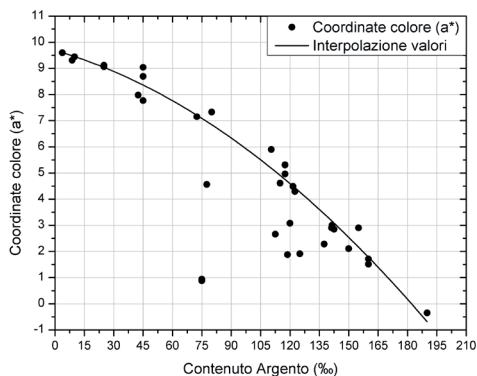


Figura 6 - Andamento di a^* in funzione del contenuto di argento

Potrebbe essere utile considerare l'andamento

del valore a^* in funzione del contenuto di rame invece che di argento (il che corrisponde bene o male a considerare la somma argento più zinco visto che le restanti aggiunte sono di modesta entità). Lo zinco, però, sembra essere più in uente dell'argento nel muovere il colore verso il verde. A nostro avviso per quanto riguarda lo zinco si può considerare un effetto doppio rispetto all'argento, anche se sarebbe molto più opportuno di parlare in intervalli di composizione. Per provare questo bisognerebbe verificare più composizioni (a valori di argento costanti) inserendo differenti contenuti di zinco.

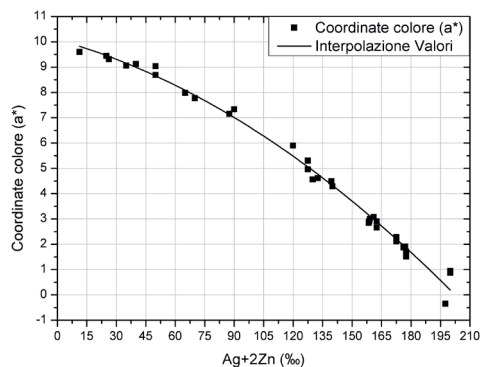


Figura 7 - Andamento di a^* in funzione del contenuto di argento sommato a 2 volte lo zinco

Si riporta comunque un grafico con l'andamento di a^* in funzione del contenuto di argento sommato a 2 volte il contenuto di zinco, figura 7. Come si nota dal grafico sembra confermata l'impressione che lo zinco lavori "il doppio" rispetto all'argento. Si fa notare che l'interpolazione ottenuta è stata calcolata tenendo conto di tutte le leghe, non si è esclusa nessuna composizione. Il valore di b^* si sposta verso il giallo al crescere del contenuto di argento (b^* rappresenta la "dimensione del colore" che va dal giallo e blu). L'interpolazione ottenuta non tiene conto delle solite leghe ricche in zinco.

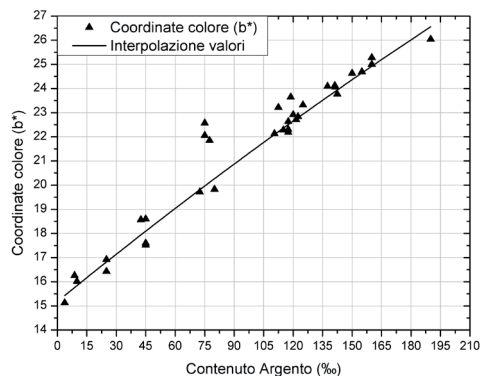


Figura 8 - Andamento di b^* in funzione del contenuto di argento

Lo zinco sembra influire meno su b^* rispetto ad

a^* , ma bisogna verificare anche questo con varie composizioni mirate. Si ha l'impressione che lo zinco abbia circa lo stesso peso dell'argento nel modificare il valore di b^* . Per tale ragione si riporta i valori di b^* in funzione del contenuto di rame (insomma per argento sommato a zinco).

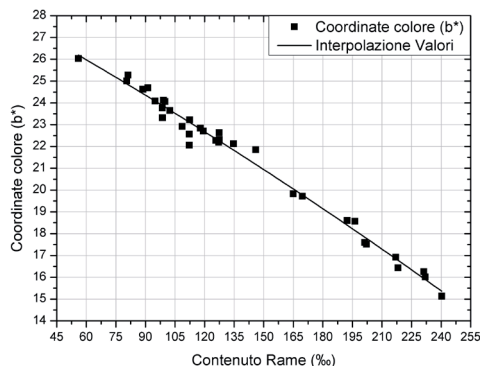


Figura 9 - Andamento di b^* in funzione del contenuto di rame

Anche in questo caso la curva di interpolazione è stata ottenuta considerando tutte le composizioni, senza nessuna esclusione. Questo grafico conferma che l'in uenza dello zinco sul valore di b^* è inferiore rispetto all'influenza che questo elemento ha su a^* .

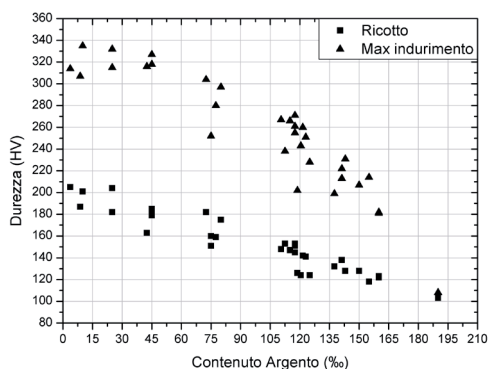


Figura 10 - Andamento della durezza in funzione del contenuto di argento

Nella figura 10 si riportano gli andamenti delle durezze rilevate. Si sono riportati solo i valori di durezza dopo solubilizzazione e dopo indurimento in quanto maggiormente rappresentativi. Infatti dopo fusione possono essere in uenzati in generale dalle condizioni di raffreddamento e dopo solubilizzazione possono essere paragonati a quelli dopo ricottura (si deve considerare che l'indurimento viene fatto a partire dallo stato solubilizzato per cui risulta più evidente un'eventuale differenza di durezza). Per quanto riguarda l'andamento della durezza è evidente che all'aumentare del contenuto di argento si ha un decremento di durezza dopo solubilizzazione e anche dopo trattamento termico di indurimento.

Con il simbolo del quadrato pieno si hanno i valori di durezza riscontrati dopo solubilizzazione, con il simbolo del triangolo pieno si è riportato il valore di durezza massimo raggiunto dopo trattamento termico di indurimento (per ogni lega si è riportato solo il valore massimo riscontrato indipendentemente dalla temperatura e tempo necessari per raggiungere quel valore).

A nostro avviso è il rame che incide maggiormente sui valori di durezza riscontrati. Lo zinco non sembra in uenzare i valori di durezza raggiungibili, o meglio riteniamo che lo zinco possa in uenzare i valori di durezza massimi raggiungibili (esempio modificando temperature e tempi per raggiungere la durezza corrispondente ad un determinato contenuto di rame), cosa che si può notare analizzando tutte le combinazioni temperatura tempo applicate negli indurimenti ma che riteniamo non interessante per gli obiettivi prefissi in questo lavoro.

Per tale motivo di seguito si riporta l'andamento della durezza in funzione del contenuto di rame per tutte le leghe, senza esclusione di nessuna.

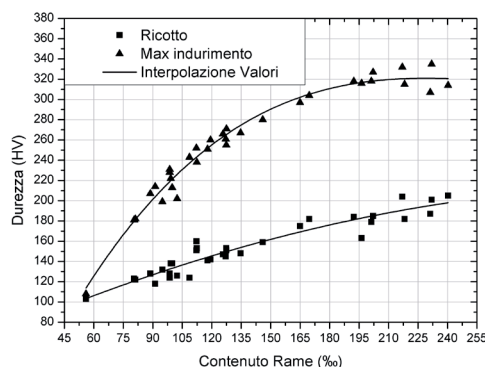


Figura 11 - Andamento della durezza in funzione del contenuto di rame

E' evidente che all'aumentare del contenuto di rame incrementa la durezza della lega dopo solubilizzazione (e dunque in generale anche dopo fusione) e soprattutto la lega può risultare indurente. Serve un contenuto minimo di rame per avere un incremento di durezza attraverso trattamento termico (quantificabile attorno agli 80-90 %).

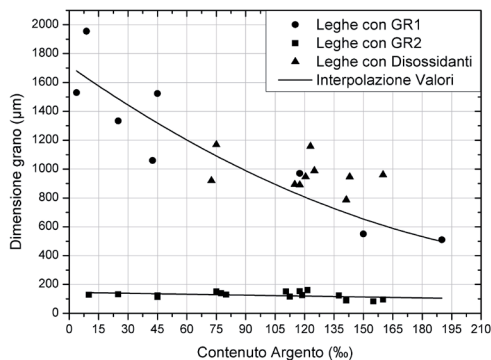


Figura 12 - Andamento della dimensione media del grano in funzione del contenuto di argento

L'analisi della dimensione del grano (figura12) ha messo in evidenza che le leghe affinate con l'affinatore 2 riescono ad avere una microstruttura affinata che può essere considerata indipendente dalla composizione principale. Più complicato risulta essere il discorso per le leghe con affinatore del grano 1 e con elementi disossidanti. Per quanto riguarda l'affinatore del grano 1 si osserva che sembra non lavorare propriamente, infatti la microstruttura risulta essere non affinata. Si può dire che ci si aspettava un andamento di questo genere in quanto l'affinatore 1 è il cobalto. Il cobalto è conosciuto come affinatore in fase solida, vale a dire che sembra ridurre o mantenere una microstruttura affinata in fase di ricottura mentre in questo lavoro la dimensione del grano è stata valutata dopo microfusione (come precedentemente spiegato). Dunque si può ipotizzare che in realtà l'affinatore 1 non abbia lavorato propriamente in microfusione e che la tendenza a diminuire la dimensione del grano con il contenuto di argento possa dipendere dal fatto che si riduce la solubilità dell'affinatore nella lega.

Per quanto riguarda la dimensione del grano per le leghe con disossidanti non si riesce a trovare una legge dipendente dal contenuto di argento. Si ritiene che nel caso di utilizzo di elementi disossidanti anche lo zinco faccia sentire il suo effetto tendendo ad accrescere la dimensione media del grano. Possiamo affermare che, mentre l'elemento affinate 2 risulta più determinante della composizione principale, gli elementi disossidanti tendono ad incrementare la dimensione del grano e sono influenzati anche dalla composizione principale.

Di seguito si prendono in considerazione i dati ottenuti solo per le leghe adatte alla microfusione e alla deformazione.

Leghe d'oro colorato 18ct in microfusione

20 sono le leghe in 18ct adatte al processo di microfusione, in particolare le leghe 3, 5, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32. In pratica, secondo la nostra esperienza, non sono adatte al processo di microfusione le leghe con affinatore 1 e quelle con zinco superiore a 17,5‰ senza elementi disossidanti.

Per quanto riguarda le leghe per microfusione si sono analizzati gli andamenti della prova di trazione. Nel grafico seguente viene riportato l'andamento del carico di rottura e di snervamento.

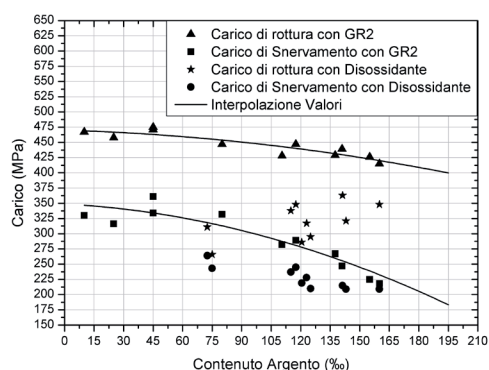


Figura 13 - Andamento carico rottura e snervamento in funzione del contenuto di argento

Risulta che per le leghe con affinatore (solo affinatore2) si può tracciare un andamento per quanto riguarda il carico di rottura e anche per il carico di snervamento (linea continua).

Si nota come i carichi diminuiscano all'aumentare del contenuto di argento. Si ha un andamento abbastanza regolare. Per le leghe con disossidanti non è possibile rilevare un andamento in funzione del contenuto di argento. E' anche vero che si hanno un numero ridotto di composizioni con disossidante. In generale si può dire soltanto che l'aggiunta di elementi disossidanti riduce notevolmente sia il carico di rottura che il carico di snervamento, rispetto a leghe con affinatore. Il carico di rottura è molto più "danneggiato" rispetto al carico di snervamento, nel senso che rispetto alle leghe con affinatore si riduce maggiormente rispetto al carico di snervamento. Dai dati rilevati (stelline piene) sembra che il carico di rottura cresca all'aumentare del contenuto di argento. A nostro avviso una spiegazione potrebbe arrivare dal grafico della durezza precedentemente analizzato. A bassi contenuti di argento si ha la tendenza ad incrementare la durezza (alti valori di rame) per cui leghe con elementi disossidanti (richiedendo tempi di raffreddamento maggiori

rispetto a leghe affinate) incrementano la loro fragilità. Questo fenomeno conferma quanto si vede nella pratica quotidiana, vale a dire per leghe ricche in rame (rosse) nel 18ct risulta molto difficile utilizzare elementi disossidanti per problemi di fragilità (non potendo raffreddarle immediatamente appena dopo fusione).

La figura 14 riporta il valore dell'allungamento in funzione del contenuto di argento. A conferma delle ipotesi di sopra l'andamento dell'allungamento risulta nettamente maggiore per le leghe con affinatore (che cresce di poco in funzione del contenuto di argento). Per le leghe disossidate invece è molto più basso e si ha un incremento del valore dell' allungamento in funzione del contenuto di argento. Da notare inoltre che a parità di contenuto di argento lo zinco riduce notevolmente l'allungamento. A parità di argento leghe con un contenuto di zinco maggiore presentano un allungamento inferiore. Bisogna approfondire questo discorso in quanto ci si aspettava il contrario, potrebbe essere che per leghe con disossidanti lo zinco aiuti ad incrementare la dimensione del grano e che questo riduca l'allungamento ma appunto probabilmente bisogna prendere in considerazione un numero maggiore di composizioni.

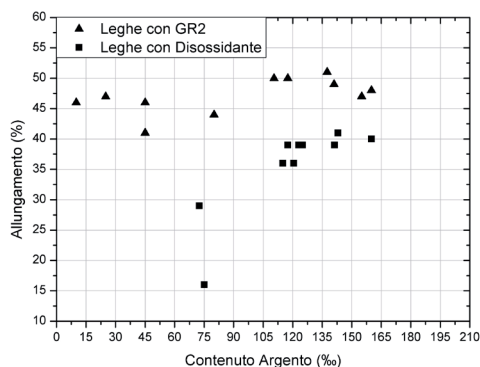


Figura 14 - Andamento dell'allungamento in funzione del contenuto di argento

Leghe d'oro colorato 18ct in deformazione plastica

24 sono le leghe in 18ct adatte al processo di deformazione plastica, in particolare leghe 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 26, 27, 30, 31, 32, 34. Per le leghe per deformazione sono stati rilevate le proprietà meccaniche, l'imbutibilità e la curva di incrudimento.

Per quanto riguarda le prove di trazione risultati sono esemplificati nel grafico seguente (figura 15).

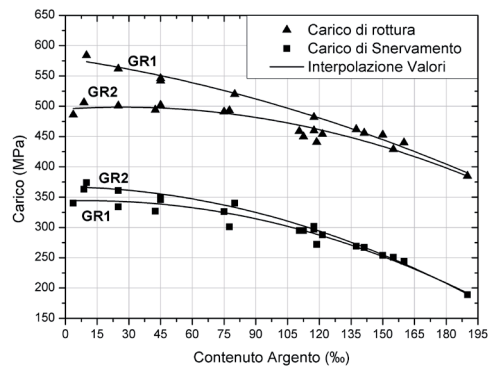


Figura 15 - Andamento del carico rottura e snervamento in funzione del contenuto di argento

Per quanto il carico di rottura la linea continua superiore rappresenta l'andamento delle leghe con affinatore 2 mentre la linea continua inferiore l'andamento delle leghe con affinatore 1. Lo stesso vale per i carichi di snervamento, linea superiore per affinatore 2 e inferiore per affinatore 1. L'affinatore 2 risulta sempre più performante, anche se la differenza tra i due affinatori sembra diminuire al crescere del contenuto di argento. Il carico di snervamento sopra un certo valore di argento risulta indipendente dal tipo di affinatore utilizzato. Si ha l'impressione che sia confermato l'andamento osservato nella dimensione del grano.

Non si è riportato l'andamento dell'allungamento in quanto risultano valori molto vicini tra loro e non è evidente nessuna relazione tra le varie composizioni (se non che alti contenuti di zinco aumentano il valore di allungamento ottenuto).

Nella figura 16 viene riportato l'andamento della prova di imbutitura. Non è possibile tracciare un andamento chiaro della tendenza dell'imbutibilità in funzione della composizione come si vede dal grafico. Questo, secondo la nostra opinione, perché l'imbutibilità è funzione di vari parametri. Abbiamo individuati i seguenti parametri principali: contenuto di zinco e dimensione del grano. A nostro avviso maggiore è il contenuto di zinco maggiore è l'imbutibilità. Dal grafico infatti le quattro leghe che hanno evidenziato una freccia maggiore al test sono le leghe con alto contenuto di zinco (Leghe 11, 16, 21, 26). La lega 14 ha evidenziato un dato che non ci si aspettava ma viene considerato come punto sperimentale e non si considera. A parità di zinco sembra che le leghe a grano maggiore evidenzino una imbutibilità maggiore rispetto alle leghe con grano minore (leghe GR1 più imbutibili rispetto a leghe con GR2, a parità di zinco). Sembra inoltre che l'imbutibilità tende a crescere al crescere del contenuto di argento, vale a dire che leghe meno dure tendono ad imbutirsi maggiormente.

Per valutare in maniera approfondita questa proprietà si necessita di effettuare un numero maggiore di prove pianificando principalmente contenuto di argento e zinco così da verificare come varia questa proprietà. Successivamente si possono effettuare altre prove sulle stesse composizioni principali inserendo l'affinatore del grano 2.

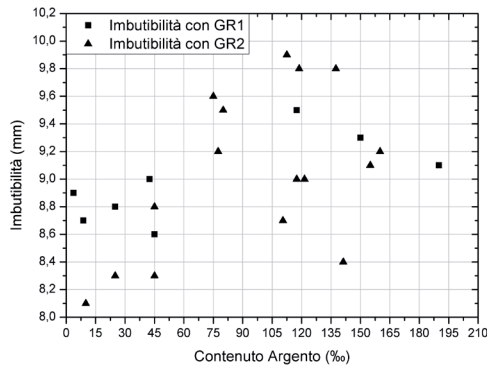


Figura 16 - Andamento dell'imbutibilità in funzione del contenuto di argento

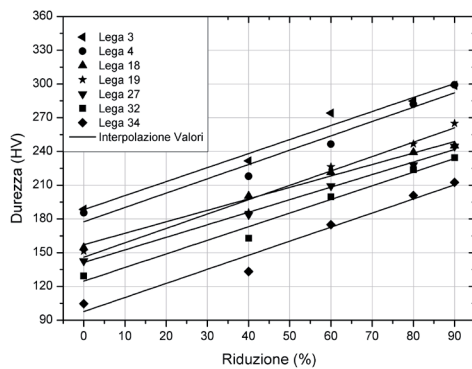


Figura 17 - Curve di incrudimento per leghe oro colorato 18ct

Per quanto riguarda gli andamenti delle curve di incrudimento in generale possiamo affermare che risulta confermato quanto visto per le durezze dopo solubilizzazione, nel senso che all'aumentare del contenuto di argento (o riducendo il contenuto di rame) il materiale risulta meno duro. Nel grafico precedente si può osservare l'andamento delle curve di incrudimento solo delle leghe 3, 4, 18, 19, 27, 32, 34 rappresentative di diversi contenuti di argento/rame. Non si riporta l'andamento di tutte le curve altrimenti non si riesce ad apprezzare l'andamento in quanto risultano troppe leghe.

Leghe d'oro bianco 18ct

Abbiamo analizzato 22 leghe. Come si nota dalla tabella 4 sono state ordinate in funzione del contenuto di nichel (e in secondo luogo di zinco). Nella tabella 4, GR1 corrisponde ad l'affinatore 1 mentre GR2 corrisponde ad una affinatore 2 (stessi elementi usati nell'oro colorato 18ct).

Campione	Au	Ni	Zn	Cu	GR1	GR2	Disossidanti	Ag
Lega 1	750	25	25	Bal- ance				
Lega 2	750	37,5	37,5	Bal- ance	X			
Lega 3	750	37,5	37,5	Bal- ance		X	X	
Lega 4	750	37,5	62,5	Bal- ance			X	
Lega 5	750	50	30	Bal- ance	X			
Lega 6	750	50	30	Bal- ance		X	X	
Lega 7	750	50	35	Bal- ance		X	X	5
Lega 8	750	50	45	Bal- ance			X	
Lega 9	750	62,5	17,5	Bal- ance		X		
Lega 10	750	62,5	30	Bal- ance				
Lega 11	750	62,5	30	Bal- ance		X	X	
Lega 12	750	62,5	35	Bal- ance				
Lega 13	750	62,5	35	Bal- ance			X	
Lega 14	750	75	35	Bal- ance				
Lega 15	750	75	35	Bal- ance			X	
Lega 16	750	75	35	Bal- ance		X	X	
Lega 17	750	75	50	Bal- ance		X	X	25
Lega 18	750	87,5	37,5	Bal- ance				
Lega 19	750	87,5	40	Bal- ance			X	
Lega 20	750	100	25	Bal- ance		X	X	
Lega 21	750	120	45	Bal- ance				
Lega 22	750	120	45	Bal- ance			X	

Tabella 4 - Leghe d'oro bianco 18ct analizzate

Anche in questo caso abbiamo analizzato la temperatura di liquidus e di solidus di tutte le 22 leghe (figura 18). Non si è riusciti a trovare un andamento generale in funzione del contenuto di nichel. Per tale motivo nel grafico sono state divise le leghe in 3 grandi gruppi (con affinatore GR1, con affinatore GR2, con disossidanti, prendendo come riferimento la tabella 4). Questo dipende probabilmente dal fatto che oltre al contenuto di nichel anche lo zinco varia in un intervallo elevato di valori. Si può solo dire che sembra che al crescere del contenuto di nichel la temperatura di liquidus e solidus cresca, che lo zinco aiuti

a ridurre queste temperature e che l'aggiunta di elementi disossidanti porti ad un abbassamento principalmente della temperatura di solidus.

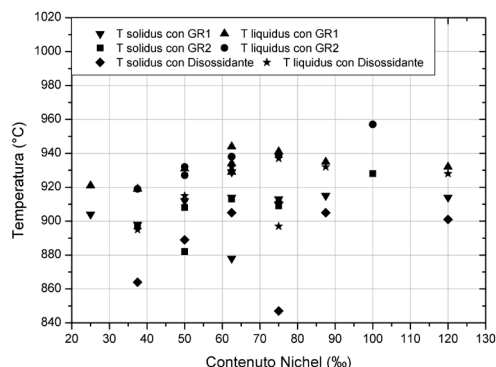


Figura 18 - Andamento della temperatura di solidus e liquidus in funzione del contenuto di nichel

Allo scopo di trovare qualche legame in più tra la composizione e gli intervalli di fusione si è provato ad analizzare separatamente le leghe con GR2 e disossidanti (adatte alla microfusione) e le leghe con GR1 e GR2 (adatte alla deformazione plastica). Per quanto riguarda le leghe per microfusione (grafico seguente) sembra che la temperatura di solidus e liquidus tenda a crescere in funzione del contenuto di nichel per leghe con GR2, mentre per leghe con disossidanti sembra che superata una certa soglia di nichel sia il liquidus che il solidus diminuiscano. Anche gli intervalli di fusione sembrano allargarsi passando dalle leghe con GR2 alle leghe con disossidanti. E' evidente che si abbassano sia le temperature di solidus e liquidus delle disossidate rispetto alle leghe con GR2. Si ritiene che queste caratteristiche siano imputabili al fatto che le leghe con soli disossidanti presentano mediamente un contenuto di zinco più elevato delle altre leghe e che questo elemento vada ad influire notevolmente sull'intervallo di fusione. Non sono state prese in considerazioni le composizioni della lega 7 e 17 in quanto contenenti argento (nichel in quantità di 50 e 75%o rispettivamente) che deprime enormemente gli intervalli fusori.

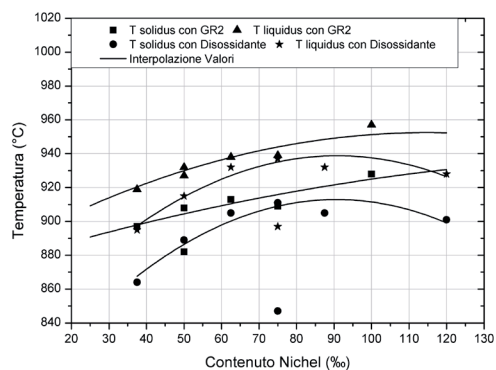


Figura 19 - Andamento della temperatura di solidus e liquidus in funzione del contenuto di nichel (solo microfusione)

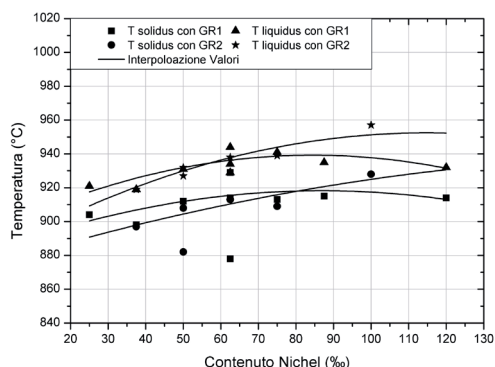


Figura 20 - Andamento della temperatura di solidus e liquidus in funzione del contenuto di nichel (solo deformazione)

Per quanto riguarda le leghe per deformazione (grafico di figura20) si nota come anche nel caso di leghe con GR1 si abbia una riduzione dell'intervallo di fusione dopo una certa soglia di nichel. D'altro canto la lega 21 presenta la stessa composizione di massima della lega 22 (per microfusione) per cui potrebbe essere che questo andamento anomalo riscontrato sia solo frutto dell'alto contenuto di zinco. In effetti, risulta evidente in tutte le composizioni che a parità di nichel con maggiore contenuto di zinco si riduce l'intervallo di fusione. Si può affermare pertanto che lo zinco modifichi sensibilmente l'intervallo di fusione.

L'andamento della densità risulta leggermente decrescente all'aumentare del contenuto di nichel (figura21). A nostro avviso si può considerare costante, in quanto la variazione di densità è veramente piccola (sull'ordine di grandezza dell'incertezza del metodo applicato). Anche lo zinco contribuisce in maniera trascurabile alla variazione della densità.

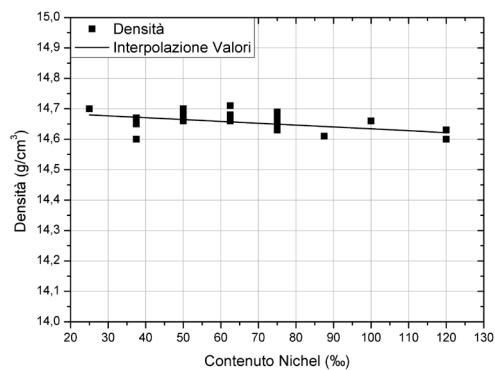


Figura 21 - Andamento della densità in funzione del contenuto di nichel

Per quanto riguarda l'andamento delle coordinate L^* , a^* e b^* si sono ottenuti i grafici seguenti.

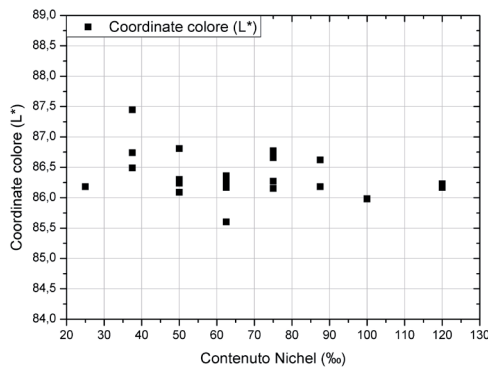


Figura 22 - Andamento di L^* in funzione del contenuto di nichel

Per la coordinata L^* sembra sia maggiormente in uenza dal contenuto di zinco, infatti per tutte le leghe a parità di contenuto di nichel i valori di L^* crescono con il contenuto di zinco. Per tale motivo non si è eseguita nessuna interpolazione sul grafico di sopra ma si è analizzato l'andamento in funzione del contenuto di zinco.

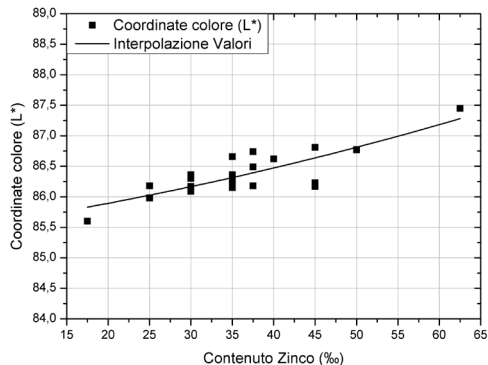


Figura 23 - Andamento di L^* in funzione del contenuto di zinco

Si nota come si abbia una crescita di L^* in funzione del contenuto di zinco, anche se probabilmente è in uenza anche da altre aggiunte (si ipotizza che i disossidanti vadano ad in uire su L^* , ma sono troppo poche le composizioni a disposizione per poterlo affermare con sicurezza).

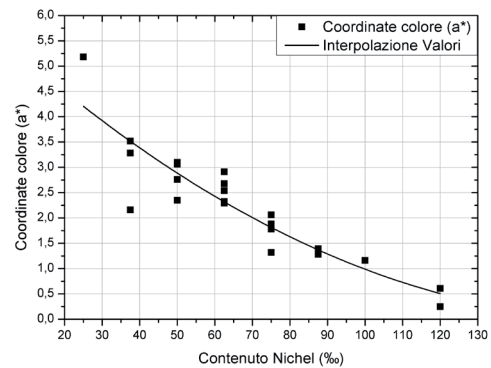


Figura 24 - Andamento di a^* in funzione del contenuto di nichel

Per quanto riguarda a^* si riesce ad ottenere un andamento in funzione del contenuto di nichel anche se probabilmente è in uenza dal contenuto di nichel sommato a quello dello zinco.

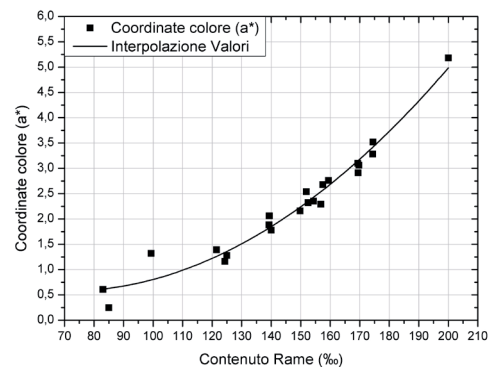


Figura 25 - Andamento di a^* in funzione del contenuto di rame

In effetti considerando i valori di a^* in funzione del contenuto di rame si ottiene una migliore interpolazione (figura 25, il dato maggiormente scostato risulta essere la lega 17 che ha però 25% di argento).

Per quanto riguarda il valore di b^* invece si riesce a determinare un certo andamento in funzione del contenuto di nichel anche se sembra che come nel caso della L^* ci sia l'enza anche di altri elementi. Se si confronta con il grafico della L^* sembra che gli elementi in uenti siano gli stessi, per cui anche in questo caso si ipotizza che l'aggiunta di disossidanti possa far variare il valore di b^* .

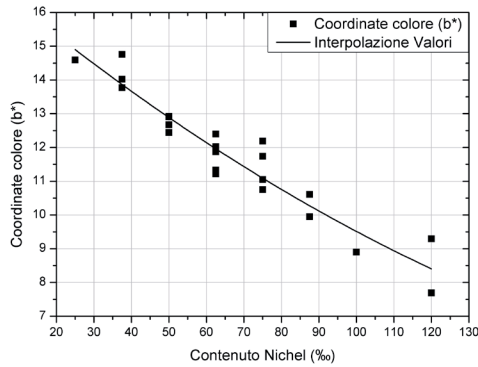


Figura 26 - Andamento di b* in funzione del contenuto di nichel

Per quanto riguarda la durezza si riporta l'andamento in funzione del contenuto di nichel. Come già spiegato nell'oro colorato si riportano i valori di durezza dopo solubilizzazione e dopo indurimento.

Come si osserva dal grafico seguente all'aumentare del contenuto di nichel si ha una tendenza ad avere una crescita delle durezza dopo solubilizzazione mentre diminuisce la massima durezza raggiungibile attraverso trattamento termico. In realtà anche in questo caso si ha una notevole dispersione di dati e risulta difficile trovare una tendenza generale. Si ritiene che ciò possa dipendere dal fatto che la durezza dipenda maggiormente dalla composizione principale (rapporto nichel-zinco-rame) e in maniera trascurabile (almeno per i nostri scopi) alle aggiunte minori (quali affinatori e disossidanti).

La dispersione di dati si ritiene derivi dalle alte differenze nei contenuti di zinco utilizzato. Ad ogni modo si è cercata una relazione che possa fornire informazioni determinanti nei processi produttivi. Si è deciso per tale ragione di analizzare l'andamento della durezza in funzione del contenuto di rame (in maniera indiretta si tiene conto anche del contenuto di nichel sommato allo zinco) ottenendo quanto riportato nel grafico di figura 28. Anche nel caso dell'oro bianco risulta evidente come sia il rame a permettere di incrementare la durezza dopo idoneo trattamento termico. Dai grafici delle durezza non si è tenuto conto dei valori della lega 7 e 17 in quanto l'aggiunta di argento non permette di paragonarle con le altre leghe.

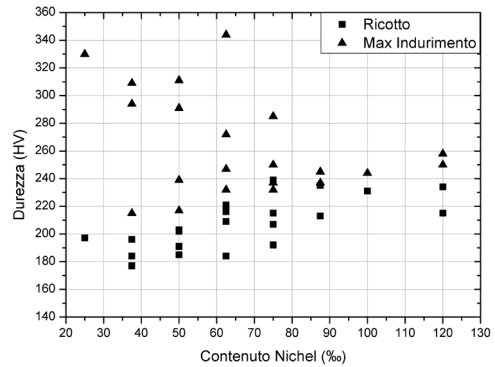


Figura 27 - Andamento durezza in funzione del contenuto di nichel

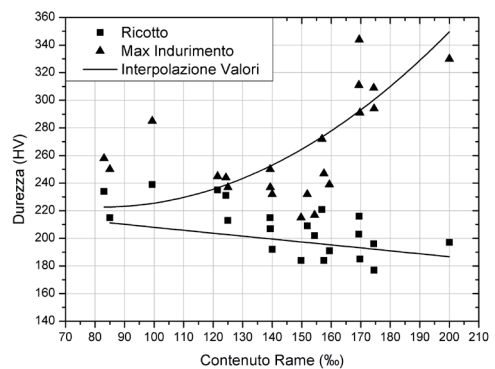


Figura 28 - Andamento durezza in funzione del contenuto di rame

Risulta difficile trovare una buona interpolazione sui dati in funzione del contenuto di rame e riteniamo che ciò sia dovuto (come più volte spiegato) ai differenti contenuti di zinco. Per tale motivo le interpolazioni proposte non sono precise (ne senso che si sono scartati numerosi dati) ma comunque aiutano ad illustrare la nostra interpretazione. Secondo noi, in generale dopo solubilizzazione, la durezza tende a diminuire all'aumentare del contenuto di rame, cosa verificabile anche nella pratica quotidiana dove la sensazione è quella che all'aumentare del contenuto di nichel la lega diventi più dura. Per quanto riguarda la massima durezza dopo trattamento termico invece sembra che le leghe inizino a diventare induribili da un contenuto di rame minimo, quantificabile da grafico attorno ai 160‰.

Per quanto riguarda la dimensione del grano risulta evidente come il GR2 sia molto più performante rispetto al GR1. L'affinatore 2 garantisce un grano piccolo e costante indipendentemente dalla composizione (intorno ai 100 µm). L'andamento della dimensione del grano con GR1 sembra confermare quanto visto per le leghe per oro colorato 18ct, vale a dire che non è performante in fusione e che probabilmente migliora le sue prestazioni al

diminuire del contenuto di rame.

L'andamento della dimensione del grano per le leghe con disossidante invece risulta più difficile da chiarire. Dalla curva di interpolazione si scopre che all'aumentare del contenuto di nichel diminuisce la dimensione media del grano (fino a valori comparabili con leghe con affinatore 2). E' un dato non atteso, in quanto gli elementi disossidanti tendono ad aumentare la dimensione media del grano. Si deve verificare se l'affinazione dipende solo dal nichel stesso (da collegare anche all'andamento delle leghe con GR1), oppure se potrebbe essere valida l'ipotesi che il nichel formi dei composti con gli elementi disossidanti che possano funzionare come affinatori del grano.

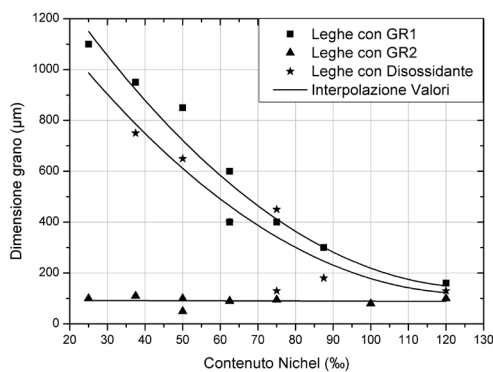


Figura 29 - Andamento dimensione grano in funzione del contenuto di nichel

Di seguito si riporta il grafico relativo alla cessione nichel. E' chiaro come gli elementi disossidanti amplifichino la cessione nichel. A parità di composizione l'aggiunta di soli elementi disossidanti incrementa notevolmente la cessione nichel. L'utilizzo dell'affinatore del grano ha un effetto benefico sulla cessione di nichel. Anche l'inserimento di argento nella lega (a parità di contenuto di nichel) riduce la cessione di nichel. Si conferma quanto già dimostrato in altri lavori, vale e dire che la cessione riscontrata non è solo funzione del contenuto di nichel.

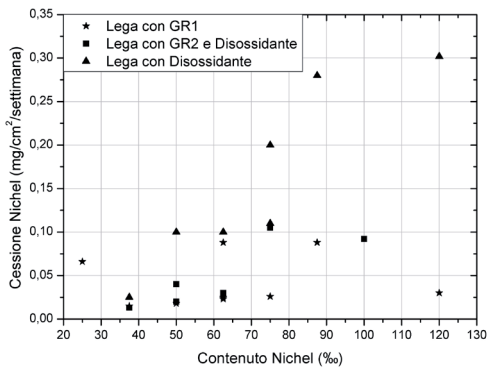


Figura 30 - Andamento cessione nichel in funzione del contenuto di nichel

Leghe d'oro bianco 18ct in micro-fusione

13 sono le leghe in 18ct adatte al processo di micro-fusione, in particolare le leghe 3, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 22. Abbiamo considerato adatte al processo di micro-fusione tutte le leghe in cui si ha la presenza anche di elementi disossidanti.

Per quanto riguarda la prova di trazione si è ottenuto il seguente andamento (figura 31).

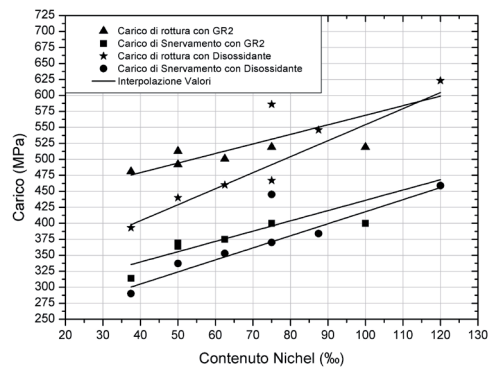


Figura 31 - Andamento carico rottura e snervamento in funzione del contenuto di nichel

In tutte le interpolazioni non si sono considerati i valori della lega 7 e 17. In generale il carico di rottura e di snervamento è maggiore per le leghe con affinatore rispetto a quelle senza (solo disossidanti). All'aumentare del contenuto di nichel aumentano la resistenza a trazione e allo snervamento. Sembra che ci sia un aumento maggiore del carico di rottura per le leghe con disossidante. Da verificare questo risultato anche se si potrebbe ipotizzare di collegarlo con il fatto che incrementando il contenuto di nichel si affina anche il grano. Si può affermare che in generale ad una microstruttura affinata corrisponde un aumento delle proprietà meccaniche.

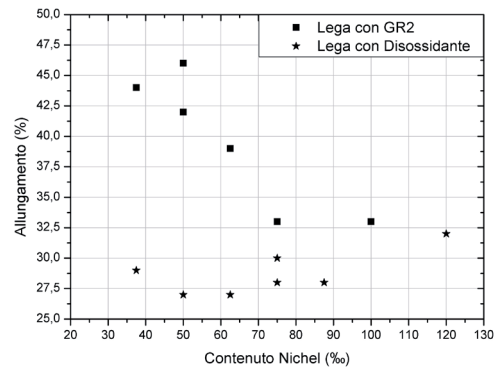


Figura 32 - Andamento allungamento in funzione del contenuto di nichel

Per quanto riguarda l'allungamento sembra che all'aumentare del contenuto di nichel si abbia una diminuzione dell'allungamento e questo è da collegarsi al fatto che aumenta il carico di rottura e di snervamento della lega (leghe con GR2).

Invece per le leghe con disossidanti si può considerare un andamento più costante degli allungamenti (anche se la lega 22 addirittura incrementa notevolmente l'allungamento). Si ritiene che questo andamento sia dovuto principalmente ai valori dello zinco, infatti le leghe con disossidanti contengono mediamente valori di zinco più alti delle altre leghe. Probabilmente bisogna collegare l'allungamento al contenuto di nichel, di zinco e alla dimensione del grano.

Leghe d'oro bianco 18ct in deformazione

15 sono le leghe in 18ct adatte al processo di deformazione, in particolare le leghe 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 21. Abbiamo considerato adatte al processo di deformazione tutte le leghe in cui non si ha la presenza di elementi disossidanti.

La valutazione delle prove meccaniche ha fornito il grafico di figura 33. Anche per le leghe in deformazione si notano delle caratteristiche meccaniche maggiori per le leghe con affinatore. L'affinatore 2 è sicuramente più performante. Si ha una crescita dei carichi di rottura e di snervamento con l'aumento del contenuto di nichel. Non si sono analizzati i valori di allungamento in quanto i valori sono molto vicini tra loro e non è possibile trovare una relazione tra loro.

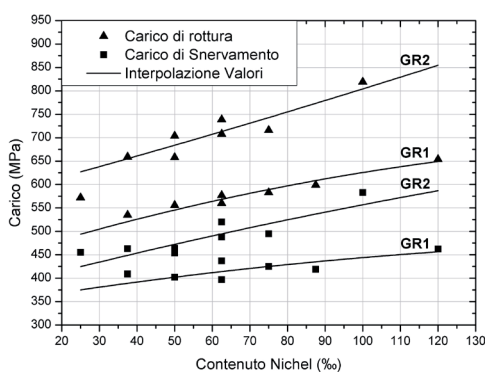


Figura 33 - Andamento carico rottura e snervamento in funzione del contenuto di nichel

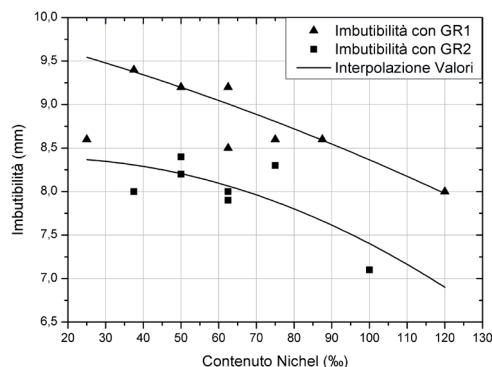


Figura 34 - Andamento imbutitura in funzione del contenuto di nichel

Nel grafico di sopra si è analizzato l'andamento della prova di imbutitura in funzione del contenuto di nichel. L'imbutibilità diminuisce con il contenuto di nichel e risulta minore per le leghe con GR2 rispetto a quelle con GR1. A parità di contenuto di nichel si ha un incremento del valore dell'imbutibilità aumentando il contenuto di zinco. I parametri che in uiscono maggiormente nell'imbutitura sono contenuto di nichel, zinco e dimensione del grano.

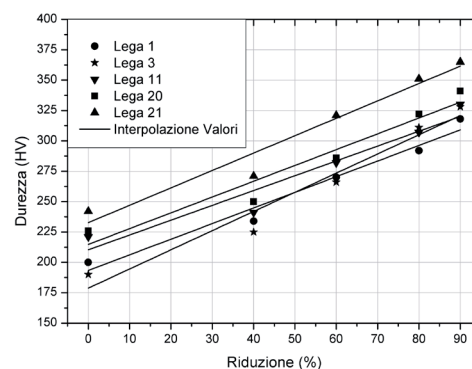


Figura 35 - Curve incrudimento per oro bianco 18ct

Per quanto riguarda le curve di incrudimento possiamo affermare che all'aumentare del contenuto di nichel il materiale tende ad incrudirsi maggiormente. Nel grafico abbiamo rappresentato le curve di incrudimento solo delle leghe 1, 3, 11, 20 e 21 per poter apprezzarne l'andamento.

Conclusioni

Il lavoro esposto è solo il primo mattone di un progetto molto ampio.

Dopo la messa a punto di un sistema di caratterizzazione adeguato si devono raccogliere e analizzare i dati in tutte le carature. Qui è stato presentato il metodo di caratterizzazione sviluppato e un'analisi dei dati in 18ct; si hanno già a disposizione i dati del 14ct e entro la fine del

2010 si ambisce a raccogliere tutti i dati riguardanti il 9 e 10ct, così che negli anni successivi sia possibile presentare le informazioni per tutte le carature. Una volta conclusa questa prima parte si intende determinare i parametri che maggiormente influiscono ogni processo produttivo in modo tale da classificare ogni composizione in funzione dell'applicazione suggerita. In tale modo sarà sempre possibile suggerire la composizione più idonea all'applicazione richiesta e nel caso la scelta sia fatta in funzione del colore si dovrebbe essere già in grado di conoscere eventuali controindicazioni o limitazioni processuali.

Di sicuro la conoscenza delle caratteristiche fisiche e chimiche di ogni lega permette un confronto tra le varie composizioni garantendo una scelta arguita su informazioni obiettive e non su sensazioni o abitudini processuali.

Per quanto riguarda la parte presentata in queste pagine riteniamo che il metodo di caratterizzazione messo a punto sia adeguato ai nostri scopi. Il quantitativo di materiale utilizzato, il numero di prove e gli stati fisici utilizzati sembrano garantire un ottimo compromesso tra i dati da raccogliere e tempistiche richieste.

Per quanto riguarda i dati raccolti li riteniamo molto interessanti e per molte proprietà si è riusciti ad ottenere degli andamenti in funzione della composizione principale. La qualità dei dati sembra buona e solo alcuni valori non hanno rispettato il trend atteso (veramente pochi valori e a nostro avviso imputabili comunque al fatto che si tratta di dati sperimentali). Sicuramente bisogna caratterizzare delle composizioni "su misura" in modo tale da poter verificare meglio degli andamenti riscontrati (questo è valido soprattutto per le leghe d'oro bianco). Questo potrebbe anche permettere di trovare l'interconnessione tra i diversi parametri quando una proprietà è influenzata da più valori (esempio quando contenuto di zinco e dimensione del grano vanno ad influire sull'imbutibilità).

Per completare il lavoro è chiaro che sarebbe il caso di indagare anche il ruolo delle piccole aggiunte (affinatori, disossidanti), ma questo è un obiettivo non contemplato per questo lavoro ma che in futuro dovrà essere fatto.

Altro punto da sviluppare è la messa a punto di prove di carattere tecnologico, ma anche queste sono secondarie (secondo le nostre priorità) ad una prima caratterizzazione delle leghe preziose.

Bibliografia

1. ASM Handbook, Vol. 2, "Properties and Selection: Non ferrous Alloys and Special-Purpose Materials"
2. Dieter Ott, Influence of Small Additions and Impurities on Gold and Jewelry Gold Alloys, The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 1997, 173-196
3. A. S. McDonald and G. H. Sistare, The Metallurgy of some Carat Gold Jewellery Alloys, Gold Bulletin, 1978, 11 (3), 66-73
4. W. S. Rapson, The Metallurgy of the Coloured Carat Gold Alloys, Gold Bulletin, 1990, 23 (4), 125-133
5. W. S. Rapson and T. Groenewald, "Gold Usage", Academic Press 1978
6. Benner L.S., Suzuki T., Meguro K., Tanaka S., "Precious Metals and Technology", International Precious Metals Institute
7. Reed-Hill R.E., Abbaschian R, "Physical Metallurgy Principles", Ed. Brooks/Cole
8. W. Nicodemi, "Metallurgia", Masson 1997