

Introduzione

Questo lavoro rappresenta il normale proseguimento del progetto presentato al Santa Fe Symposium nel 2010, nel quale è stato messo a punto un sistema di caratterizzazione e un'analisi dei dati su leghe d'oro a 18 ct. Questo lavoro ha permesso di correlare le proprietà fisico-meccaniche di ciascuna lega con la composizione chimica e quindi di poter agevolmente individuare la migliore soluzione per realizzare un determinato articolo.

In questo elaborato sono presentati i dati relativi all'analisi delle leghe d'oro colorato e bianco a 14 ct, prendendo in esame sia quelle adatte al processo di microfusione sia quelle adatte alla deformazione. La metodica di caratterizzazione applicata risulta esattamente la stessa presentata nel lavoro del Santa Fe Symposium del 2010 e dunque non verrà riportata nuovamente.

Analisi Dati

Le leghe d'oro colorato nel caso del 14 ct sono state suddivise in leghe d'oro giallo e leghe d'oro rosso. Questa distinzione è stata adottata poiché avevamo a disposizione numerose leghe d'oro rosso e pertanto si è deciso di ripartirle in due categorie così da riuscire ad effettuare un'analisi più accurata. Di seguito ometteremo di specificare che si tratta di leghe d'oro 14 ct in quanto tutta l'analisi del presente lavoro è fatta solo su leghe 14 ct.

Le leghe d'oro giallo analizzate sono trentadue e sono riportate nella Tabella 1. Tali leghe sono state ordinate in ordine crescente rispettivamente in funzione del contenuto d'argento e zinco.

Nella tabella è stato inoltre evidenziato la presenza di affinatori o elementi disossidanti per ciascuna lega.

Tabella 1 - Leghe d'oro giallo 14 ct analizzate

Campione	Au	Ag	Zn	Cu	GR1	GR2	Disossidanti
Lega 1	585	20,75	41,5	Balance	X		
Lega 2	585	20,75	58,1	Balance	X		
Lega 3	585	20,75	66,4	Balance	X		
Lega 4	585	20,75	95,45	Balance		X	
Lega 5	585	20,75	95,45	Balance	X		
Lega 6	585	20,75	95,45	Balance			X
Lega 7	585	41,5	58,1	Balance		X	
Lega 8	585	41,5	70,55	Balance			X
Lega 9	585	41,5	83	Balance	X		
Lega 10	585	41,5	95,45	Balance			X
Lega 11	585	51,875	56,025	Balance			X
Lega 12	585	53,95	95,45	Balance		X	
Lega 13	585	62,25	62,25	Balance	X		
Lega 14	585	62,25	62,25	Balance			X
Lega 15	585	83	41,5	Balance	X		
Lega 16	585	83	62,25	Balance	X		
Lega 17	585	83	66,4	Balance			X
Lega 18	585	95,45	37,35	Balance			X
Lega 19	585	95,45	53,95	Balance			X
Lega 20	585	101,675	66,4	Balance	X		
Lega 21	585	103,75	83	Balance			X
Lega 22	585	119,935	39,965	Balance		X	
Lega 23	585	124,5	103,75	Balance	X		
Lega 24	585	124,5	103,75	Balance			X
Lega 25	585	128,65	43,575	Balance	X		
Lega 26	585	130,725	42,745	Balance			X
Lega 27	585	186,75	41,5	Balance	X		
Lega 28	585	195,05	8,3	Balance	X		
Lega 29	585	228,25	29,05	Balance	X		
Lega 30	585	234,475	14,525	Balance	X		
Lega 31	585	257,3	6,225	Balance	X		
Lega 32	585	265,6	14,525	Balance	X		

In primo luogo sono stati riportati i valori delle temperature di Solidus e Liquidus, identificate rispettivamente con un quadrato e con un triangolo, di tutte le leghe riportate in Tabella 1. Si è eseguita una prima interpolazione considerando tutti i valori ottenendo il grafico di Figura 1.

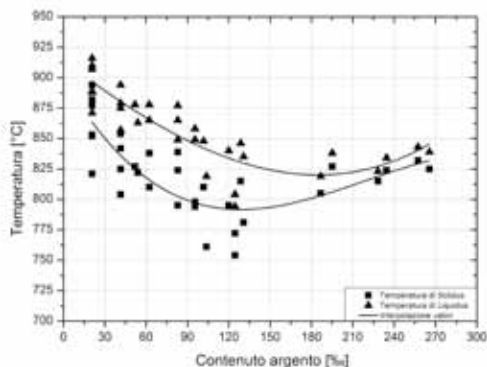


Figura 1 – Variazione della temperatura di Solidus e Liquidus in funzione del contenuto d'argento

In un secondo momento si è deciso di ottenere le curve di interpolazione escludendo i valori della temperatura di Liquidus e Solidus delle leghe con un contenuto di zinco superiore a 80%, ovvero le leghe 4, 5, 6, 9, 10, 12, 21, 23, 24. L'interpolazione è stata pertanto eseguita su 23 valori e si può osservare nel grafico di Figura 2.

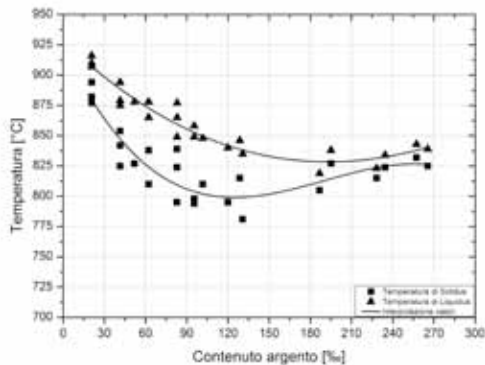


Figura 2 – Interpolazione del Solidus e del Liquidus escludendo le leghe con un contenuto di zinco maggiore di 80%

Analizzando le variazioni dei dati sperimentali in funzione del contenuto d'argento si può notare che all'aumentare di quest'ultimo sia la temperatura di Solidus che quella di Liquidus in una prima fase ha un andamento a decrescere mentre in una seconda fase l'andamento è crescente. La differenza tra i valori interpolati per il Liquidus ed il Solidus diminuisce all'aumentare del contenuto d'argento, in maniera opposta a quanto osservato con le leghe in 18 ct. Questo può essere associato al fatto che nel caso delle leghe per il 14 ct all'aumentare del contenuto d'argento diminuisce quello dello zinco. Probabilmente l'ampio

intervallo di fusione è anche influenzato dal contenuto di zinco (che ripetiamo risulta mediamente più ampio per le leghe con un minor contenuto di argento).

Nel grafico di Figura 3 è riportata la variazione della densità in funzione del contenuto d'argento. E' possibile osservare che l'aumento del contenuto d'argento comporta un aumento della densità. L'influenza sulla densità dello zinco può essere osservata prendendo in considerazione le leghe 1, 2, 3, 4 nelle quali a parità di contenuto d'argento lo zinco aumenta dalla lega 1 alla lega 4. Emerge che a parità d'argento con l'aumentare dello zinco la densità diminuisce.

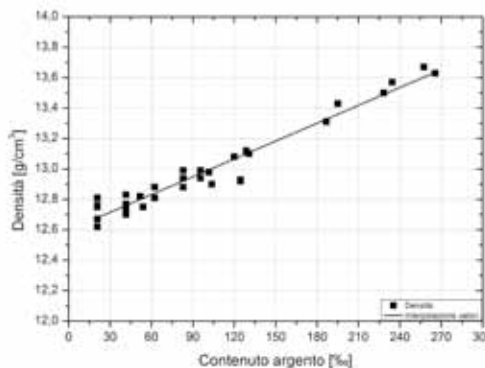


Figura 3 – Variazione della densità in funzione del contenuto d'argento

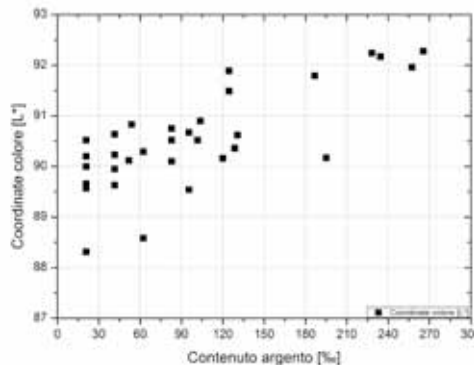


Figura 4 – Variazione coordinate colore L* del contenuto d'argento

Analizzando la variazione delle coordinate colore L*, Figura 4, si ha in generale un aumento di L* con il contenuto d'argento. Sembra anche che a parità d'argento all'aumentare del contenuto di zinco si abbia un incremento del valore di L* (in tal caso si hanno pochi dati a disposizione). Tuttavia non si riesce a trovare una legge che governi il fenomeno.

Per tale motivo si è provato ad analizzare l'andamento di L* in funzione della somma di argento e del doppio contenuto di zinco. In questo modo si è ottenuto un andamento più delineato anche se a nostro avviso non ancora accettabile in quanto ci sono dei dati piuttosto lontani dalla curva di

interpolazione (ad esempio la lega 13 è molto scostata dalla curva interpolata).

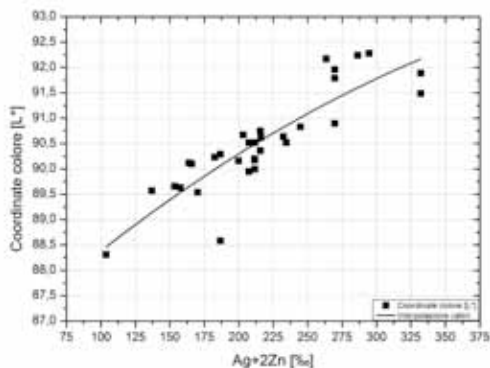


Figura 5 – Variazione coordinate colore L* del contenuto d’argento e del doppio dello zinco

Nelle coordinate colore a^* , all’aumentare del contenuto di argento il colore passa dal rosso verso il verde. In Figura 6 si è considerato l’andamento di a^* in funzione della somma tra il contenuto di argento e il doppio di zinco. Questo in quanto lo zinco sembra influire maggiormente rispetto all’argento nel far virare il colore verso il verde. Prendendo in esame tutte le leghe, a nostro avviso, possiamo affermare che l’interpolazione ottenuta è buona ed essa ci consente peraltro di confermare che lo zinco ha una “influenza doppia” rispetto all’argento nel modificare il colore verso il verde.

Nelle coordinate colore b^* , nelle quali la “dimensione del colore” varia dal giallo al blu, si osserva un andamento crescente all’aumentare del contenuto di argento e zinco con relativo spostamento verso il giallo (Figura 7). Confrontando le leghe 21, 27, 30 e 31 si nota che aumentando il contenuto di zinco si registra uno spostamento progressivo delle coordinate colore b^* verso il blu. La curva di interpolazione è stata ricavata escludendo i dati relativi alle leghe 23 e 24 in quanto risultano lontani dagli altri punti (sono i due punti a destra nel grafico, molto in basso rispetto a tutti gli altri dati). In effetti si tratta delle due leghe con maggiore contenuto di zinco e probabilmente questo incide fortemente sul dato sperimentale finale.

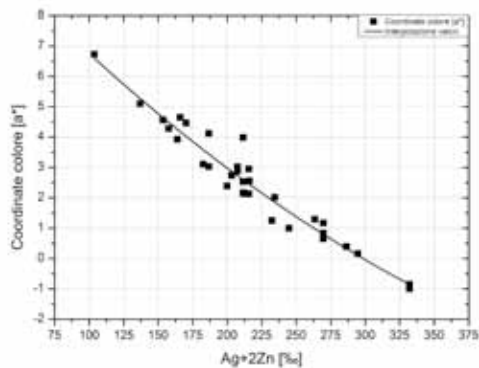


Figura 6 – Variazione coordinate colore a^* in funzione del contenuto d’argento e del doppio dello zinco

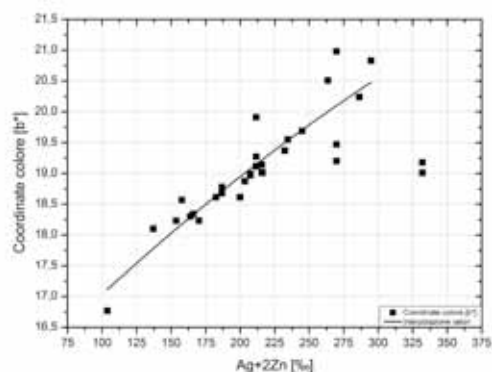


Figura 7 – Variazione coordinate colore b^* in funzione del contenuto d’argento e del doppio dello zinco

Procediamo analizzando gli andamenti delle durezze rilevate. In Figura 8 sono riportate le variazioni della durezza dopo solubilizzazione e della durezza dopo indurimento in quanto riteniamo siano le maggiormente rappresentative, come già spiegato nel lavoro presentato al Santa Fe Symposium del 2010. Le durezze dopo fusione, al contrario, potrebbero essere influenzate dalle condizioni di raffreddamento.

Dal grafico risulta evidente che all’aumentare del contenuto d’argento si ha un incremento di durezza (esattamente l’opposto di quanto visto per 18 ct) sia per i campioni solubilizzati che per quelli induriti. Il simbolo del quadrato pieno rappresenta le durezze dopo solubilizzazione mentre il triangolo pieno è riferito alle durezze dopo trattamento termico di indurimento (a tal proposito si è riportato il valore di durezza massimo rilevato indipendentemente dalla temperatura e dal tempo necessari per raggiungere quel determinato valore). Dai dati ottenuti sembra chiaro che l’argento è l’elemento che incide maggiormente sulla durezza riscontrata. Questo ci fa dedurre che l’indurimento avvenga per precipitazione di una seconda fase ricca d’argento e non per ordine e disordine come avviene nelle leghe in 18 ct.

A parità di contenuto di argento le leghe con più zinco sembrano presentare valori di durezza leggermente più bassi. Da verificare se lo zinco possa influenzare i massimi valori di durezza raggiungibili modificando temperatura e tempi necessari, dai dati a disposizione sembra che a parità d'argento una lega con più zinco riesca a raggiungere i massimi valori di durezza con un tempo di permanenza in forno inferiore.

Dal grafico di Figura 8 sembra che una lega per essere considerata indurente (attraverso idoneo trattamento termico) debba contenere almeno 75% d'argento.

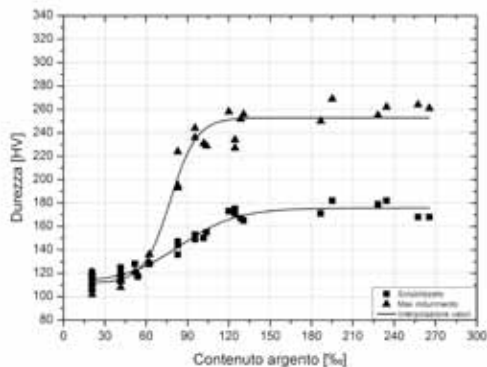
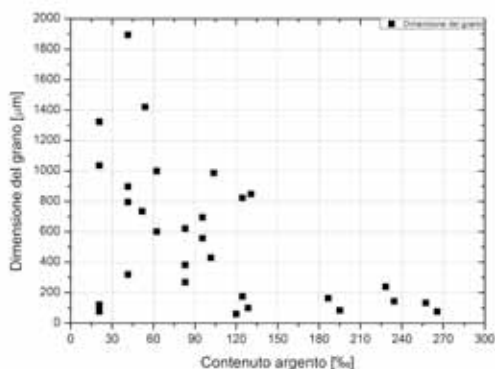


Figura 8 - Variazione durezza in funzione del contenuto d'argento



9 - Variazione della dimensione del grano in funzione del contenuto d'argento

Per quanto riguarda la dimensione del grano dal grafico in Figura 9 non si riesce ad ottenere un andamento in funzione del contenuto d'argento. Si può solo dire che le leghe con affinatore 1 (GR1) risultano mediamente ben affinate mentre le leghe con affinatore 2 (GR2) presentano un grano notevolmente maggiore (si potrebbero considerare come leghe non affinate); mentre le leghe con l'elemento disossidante sono sicuramente quelle con il grano maggiore tra tutte. Nel 14 ct è stato confermato quanto osservato per il 18 ct. Anche in questo caso infatti l'affinatore 2 è il cobalto e riteniamo che come per il 18 ct questo elemento vada considerato come un affinatore in fase solida, nel senso che riesce a mantenere un grano

relativamente piccolo solo durante il processo di ricottura.

Prima di analizzare le leghe d'oro rosso in 14 ct sono stati presi in esame, separatamente, i dati relativi alle leghe adatte alla microfusione e i dati relativi alle leghe adatte alla deformazione.

Leghe d'oro giallo 14 ct in microfusione

Leghe in 14 ct adatte al processo di microfusione sono undici, precisamente le leghe 6, 8, 10, 11, 14, 17, 18, 19, 21, 24, 26. A differenza del 18 ct consideriamo come leghe adatte al processo di microfusione le leghe contenenti almeno un elemento disossidante, in quanto in 14 ct l'elevato contenuto di zinco potrebbe favorire la presenza di difetti superficiali. Onestamente potrebbero essere considerate leghe adatte alla microfusione anche quelle contenenti poco zinco (senza disossidante) quali per esempio la lega 28 o la lega 31, tuttavia, preferiamo considerare e suggerire per microfusione nel 14 ct solo leghe contenenti disossidante. Il carico di rottura e di snervamento dopo fusione, Figura 10, presentano un andamento crescente al crescere del contenuto d'argento.

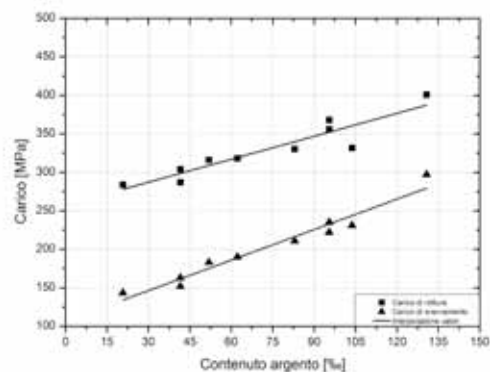


Figura 10 - Variazione del carico di rottura e di snervamento dopo fusione in funzione del contenuto d'argento

In generale si può considerare che il carico di rottura cresca con l'incremento dell'argento. Lo scostamento di alcuni dati è da attribuire all'elevato contenuto di zinco. Ad esempio la lega 24 risulta essere quella che presenta in assoluto il maggior contenuto di zinco ed è quella che presenta il maggior scostamento dalla curva d'interpolazione calcolata. Sembra che al crescere del contenuto di zinco diminuisca sia il carico di rottura che il carico di snervamento.

Si fa notare che per quanto riguarda le leghe disossidate si arriva ad un contenuto massimo di argento attorno ai 130%. Questa scelta risulta quasi obbligata in quanto l'elemento disossidante

maggiormente utilizzato è il silicio e quest'ultimo non gode di una buona solubilità nel sistema oro-argento ma tende ad essere segregato a bordo grano formando dei composti basso fondenti che infragiliscono notevolmente la lega. Per tale ragione nel 14 ct non si inserisce un contenuto di argento superiore a 130‰ quando viene utilizzato il silicio (nelle quantità di silicio presenti nelle nostre leghe).

Per quanto riguarda l'allungamento dopo fusione si ha una andamento decrescente con il contenuto di argento. In questo caso al crescere dell'argento diminuisce l'allungamento, in linea con quanto osservato con il carico di rottura e di snervamento (nel senso che a carichi di rottura e snervamento maggiori corrispondono allungamenti minori). Nel successivo grafico, Figura 11, sono state riportate solo le leghe contenenti silicio (lega 6, 8, 10, 11, 14, 17, 18, 19, 21, 24, 26).

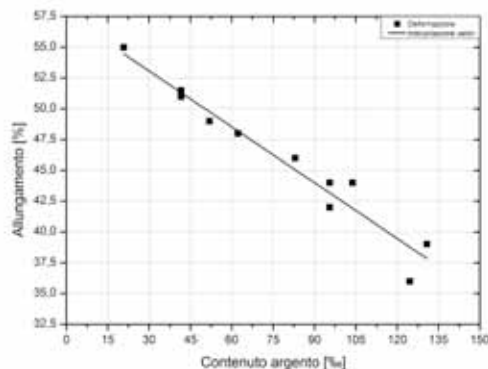


Figura 11 – Variazione dell'allungamento dopo fusione in funzione del contenuto d'argento

Leghe d'oro giallo 14 ct in deformazione

Le leghe in 14 ct adatte al processo di deformazione plastica sono ventuno, vale a dire le leghe 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 13, 15, 16, 20, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32. In questo caso sono state considerate adatte alla deformazione le leghe contenenti almeno un affinatore. Per le leghe per deformazione plastica sono state rilevate le proprietà meccaniche, l'imbutibilità e la curva di incrudimento.

Per quanto riguarda il carico di rottura e di snervamento dopo ricottura i risultati sono stati riportati nel grafico in Figura 12.

Anche in questo caso si può notare come all'aumentare del contenuto d'argento aumenti sia il carico di rottura e sia il carico di snervamento. Dal grafico è evidente che ci sono molti punti sperimentali che si allontanano dalla retta interpolatrice. Questo può essere associato a diversi fattori correlati alla composizione chimica di ogni singola lega ma in primo luogo dipende dal contenuto

di zinco. A nostro avviso maggiore è la quantità di zinco e minore sarà il carico di rottura e di snervamento. Le leghe con affinatore 1 presentano un carico di rottura e di snervamento maggiore delle leghe con affinatore 2.

L'andamento della deformazione dopo ricottura, Figura 13, decresce all'aumentare del contenuto d'argento. Si fa notare che le leghe con basso carico di rottura sono quelle che presentano elevata deformazione, come ci si attendeva. All'aumentare dello zinco tende ad aumentare anche l'allungamento. Rispetto alle leghe per microfusione, ossia rispetto alle leghe con solo l'elemento disossidante, il carico di rottura e di snervamento è molto più alto mentre l'allungamento risulta inferiore (si possono confrontare tra loro i grafici in Figura 10 e 12 e i grafici in Figura 11 e 13).

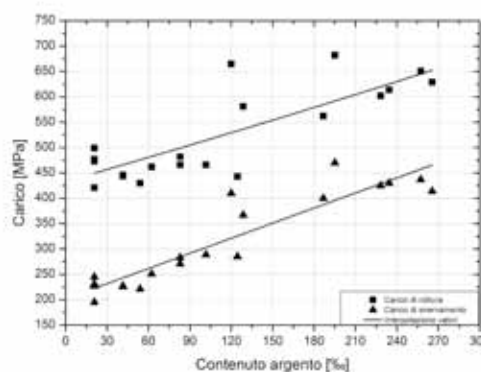


Figura 12 – Variazione del carico di rottura e di snervamento dopo ricottura in funzione del contenuto d'argento

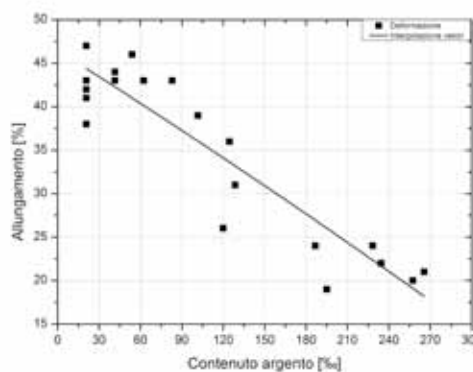


Figura 13 – Variazione dell'allungamento in funzione del contenuto d'argento

I valori d'imbutitura, Figura 14, dipendono sensibilmente sia dal contenuto d'argento che dal contenuto di zinco. In particolare nel successivo grafico, è possibile riscontrare un andamento decrescente dell'imbutitura all'aumentare del contenuto di argento mentre a parità di quest'ultimo si osserva che aumentando il contenuto di zinco l'imbutitura aumenta. Un altro parametro che influenza questa proprietà è la dimensione del grano. A parità di contenuto di argento e zinco,

ovvero per le leghe 4, 5 e 6, si evidenzia che tanto maggiore è la dimensione del grano tanto maggiore è il valore dell'imbutibilità.

Nell'interpolazione del grafico di Figura 14 non sono stati considerati i valori delle leghe con l'affinatore 2 vale a dire la 4, 7, 12 e la 22 (rappresentati nel grafico con delle stelline).

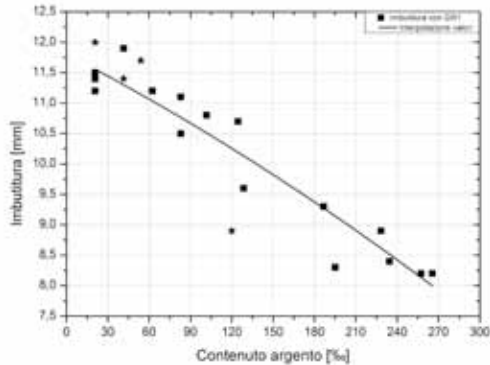


Figura 14 - Variazione dell'imbutitura con affinatori in funzione del contenuto d'argento

Nel grafico di Figura 15 sono stati riportati i valori di incrudimento solo di alcune leghe (leghe 1, 13, 16, 20, 25, 28, 30, 32) rappresentative di diversi contenuti d'argento. Dall'andamento delle curve di incrudimento possiamo affermare che all'aumentare del contenuto d'argento il materiale tende ad incrudirsi maggiormente.

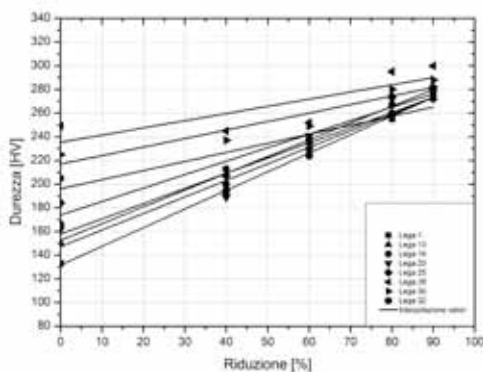


Figura 15 - Curve incrudimento per oro giallo 14 ct

Leghe d'oro rosso 14 ct

Le leghe d'oro rosso analizzate e riportate in Tabella 2 sono 18. Tali leghe sono state ordinate in ordine crescente rispettivamente in funzione del contenuto d'argento e di zinco.

Tabella 2 - Leghe d'oro rosso 14 ct analizzate

Campione	Au	Ag	Zn	Cu	GR1	GR2	Disossidanti
Lega 1	585	6.225	6.225	Balance		X	
Lega 2	585	6.225	6.308	Balance			X
Lega 3	585	10	15	Balance	X		
Lega 4	585	14.525	14.525	Balance		X	
Lega 5	585	16.6	12.45	Balance	X		
Lega 6	585	41.5	8.3	Balance		X	
Lega 7	585	41.5	12.45	Balance	X		
Lega 8	585	45.65	24.9	Balance	X		
Lega 9	585	50	15	Balance	X		X
Lega 10	585	52	5	Balance	X		X
Lega 11	585	56.025	20.75	Balance			X
Lega 12	585	70.55	18.675	Balance		X	
Lega 13	585	74.7	4.15	Balance		X	
Lega 14	585	74.7	4.15	Balance	X		
Lega 15	585	74.7	4.15	Balance	X		
Lega 16	585	83	20.75	Balance	X		
Lega 17	585	120.35	12.45	Balance			X
Lega 18	585	132.8	8.3	Balance	X		

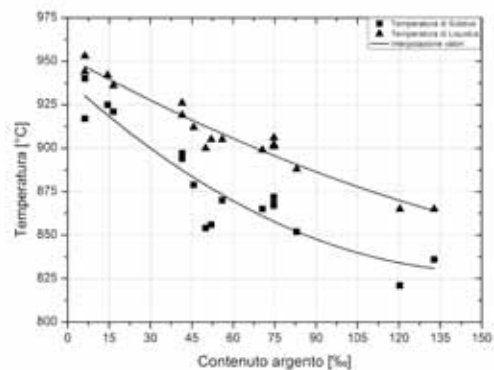


Figura 16 - Variazione della temperatura di Solidus e di Liquidus in funzione del contenuto d'argento

A differenza delle leghe d'oro giallo si nota che all'aumentare del contenuto d'argento sia la tem-

peratura di Solidus che di Liquidus diminuiscono progressivamente, con un andamento a decrescere più marcato per la temperatura di Solidus. A contenuti maggiori di argento la differenza tra Liquidus e Solidus risulta maggiore (si allarga l'intervallo di fusione delle leghe).

Passando ad analizzare la densità si nota come per l'oro giallo 14 ct ci sia una crescita in funzione del contenuto di argento. Per quanto riguarda l'influenza dello zinco non possono essere fatte particolari considerazioni in quanto il numero delle leghe analizzate e la variazione del contenuto di zinco non lo permette (da tenere in considerazione che parliamo di una variazione massima di densità che si aggira su un intervallo di $0,5 \text{ g/cm}^3$). L'interpolazione è stata fatta senza considerare le leghe 12 e 15 in quanto si scostavano molto da gli altri risultati come si può vedere anche nel grafico sottostante in Figura 17 (identificate con due stelline).

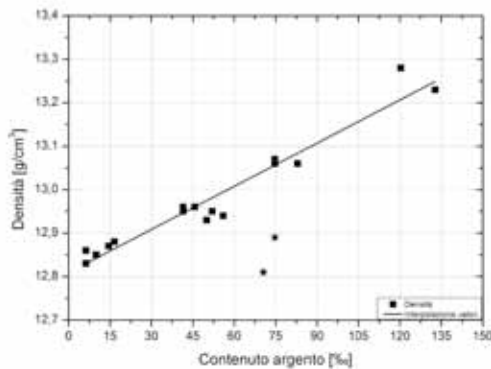


Figura 17 – Variazione della densità in funzione del contenuto d'argento

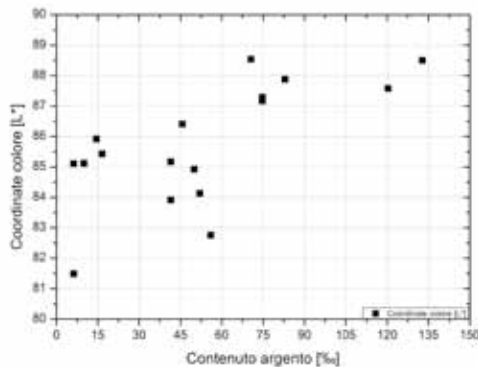


Figura 18 – Variazione coordinate colore L* in funzione del contenuto d'argento

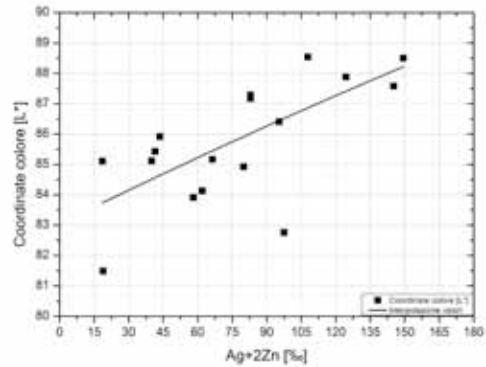


Figura 19 – Variazione coordinate colore L* in funzione del contenuto d'argento e doppio dello zinco

L'andamento di L* in funzione del contenuto d'argento non ci fornisce un'interpolazione accettabile (Figura 18). Possiamo solo dire che all'aumentare dell'argento anche il valore di L* tende a crescere e che non siamo in grado di determinare con che legge. Anche provando a considerare il "doppio lavoro" dello zinco, Figura 19, non si riesce ad ottenere una curva accettabile. In ogni caso abbiamo provato a segnare un andamento di L* crescente in funzione dell'argento e del doppio dello zinco in Figura 19.

Nel caso di a* e b* invece, considerando l'andamento in funzione dell'argento sommato al doppio dello zinco si riesce ad ottenere degli andamenti più che accettabili. Come ci si aspettava per a* aumentando il contenuto di argento e zinco il colore tende a spostarsi verso il verde (meno rosso) e appunto lo zinco ha un effetto doppio rispetto all'argento (a parità di contenuto). Il valore di b* si sposta verso il colore giallo all'aumentare dell'argento e dello zinco.

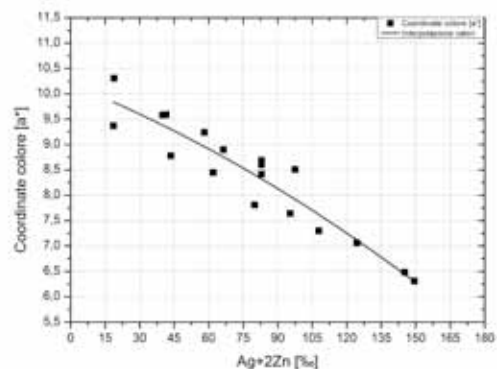


Figura 20 – Variazione coordinate colore a* in funzione del contenuto d'argento e del doppio dello zinco

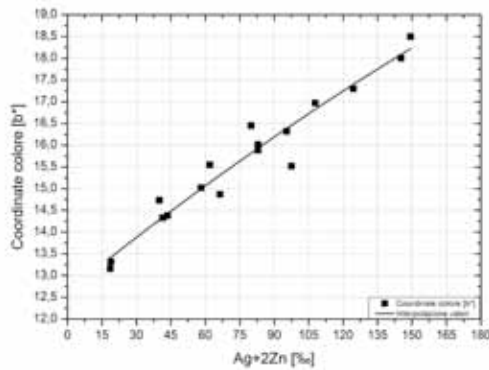


Figura 21 – Variazione coordinate colore b* in funzione del contenuto d'argento e del doppio dello zinco

Per quanto riguarda la durezza a nostro avviso valgono le stesse considerazioni effettuate per l'oro giallo. Vale a dire che la durezza tende ad aumentare con il contenuto d'argento. Si evidenzia che per valori inferiori a 60% d'argento non sussiste nessuna differenza tra la durezza prima e dopo trattamento termico d'indurimento. Anche in questo caso si fissa a 75% d'argento il contenuto minimo per avere un incremento di durezza accettabile attraverso trattamento termico. Dunque anche in questo caso l'indurimento avviene per precipitazione e non viene influenzato da un eventuale ordinamento oro-rame.

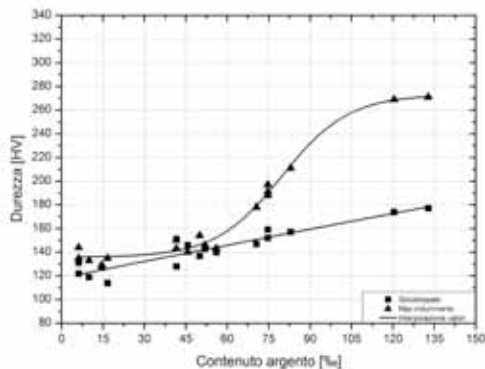


Figura 22 – Variazione durezza in funzione del contenuto d'argento

Leghe d'oro rosso 14 ct in microfusione

Le leghe in 14 ct adatte al processo di microfusione sono dodici, precisamente le leghe 2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18. Abbiamo considerato, per quanto riguarda l'oro rosso 14 ct, leghe adatte al processo di microfusione solo le leghe contenenti almeno un elemento disossidante o l'affinatore 1, con un contenuto di zinco inferiore a 21% (per cui ad esempio viene esclusa la lega 8).

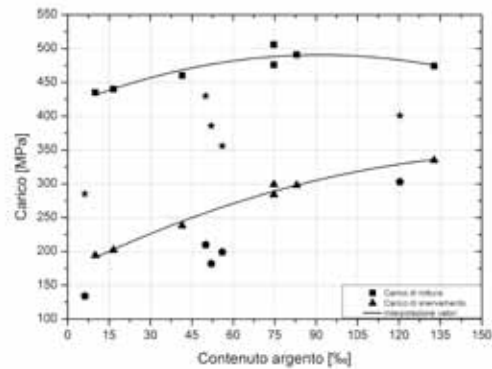


Figura 23 – Variazione del carico di rottura e di snervamento dopo fusione in funzione del contenuto d'argento

Nel grafico di Figura 23 è possibile osservare come il carico di rottura e di snervamento tendano ad aumentare con il contenuto d'argento. Sembra che il carico di snervamento sia maggiormente influenzato dal contenuto d'argento rispetto al carico di rottura. Gli andamenti sono stati determinati senza considerare le leghe contenenti l'elemento disossidante, rappresentate dalle stelline e dai pentagoni (lega 2, 9, 10, 11, 17). Non si è riusciti ad ottenere un andamento considerando tutte le leghe per microfusione confermando quanto l'elemento disossidante vada a influenzare le proprietà meccaniche delle leghe in esame. Sempre dallo stesso grafico è possibile osservare che le leghe con elemento disossidante presentano un andamento simile delle leghe con solo affinatore relativamente al carico di snervamento (si potrebbe tracciare un andamento del tutto analogo delle leghe con solo affinatore). Anche per quanto riguarda il carico di rottura possiamo considerare che l'andamento sia analogo delle leghe con solo affinatore, infatti le due stelline maggiormente scostate risultano quelle relative alla lega 9 e 10 che oltre al disossidante presentano anche l'affinatore che dunque sembra incrementare il carico di rottura maggiormente rispetto allo snervamento in presenza di disossidante. Concludendo, a nostro avviso, possiamo affermare che il disossidante riduce le proprietà meccaniche delle leghe ma che l'andamento in funzione del contenuto d'argento rimane circa lo stesso delle

leghe con affinatore. Si può anche affermare che il disossidante deprime maggiormente il carico di rottura rispetto al carico di snervamento.

Nel grafico di Figura 24 è riportato l'andamento dell'allungamento senza considerare le leghe 2, 9, 10, 11, 17 (segnate in Figura 24 con delle stelline), vale a dire le leghe con disossidante. Si osserva come l'allungamento diminuisce al crescere del contenuto di argento (in accordo con la crescita delle proprietà meccaniche osservate in Figura 23). Anche nel caso dell'allungamento riteniamo valide le considerazioni precedenti sull'elemento disossidante vale a dire che in generale riduce l'allungamento in funzione dell'argento e che le leghe 9 e 10 non rispecchino questo andamento in quanto contenenti anche affinatore. Anche l'allungamento delle leghe disossidate risulta minore rispetto alle leghe con affinatore.

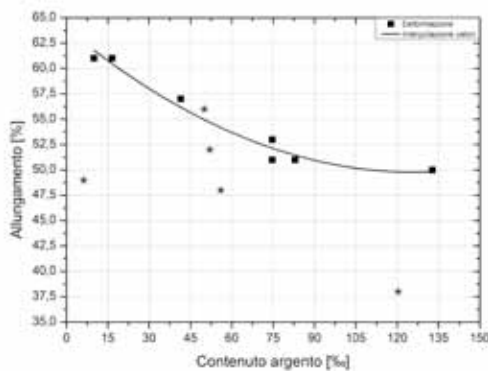


Figura 24 – Variazione dell'allungamento dopo fusione in funzione del contenuto d'argento

Leghe d'oro rosso 14 ct in deformazione

Le leghe in 14 ct adatte al processo di deformazione plastica sono tredici, vale a dire le leghe 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 18. In questo caso sono state considerate adatte alla deformazione le leghe contenenti almeno un affinatore (indipendentemente se si tratta dell'affinatore 1 o 2). Per le leghe per deformazione plastica sono state rilevate le proprietà meccaniche, l'imbutibilità, e la curva di incrudimento. Con le stelline e pentagoni sono segnate le leghe contenenti affinatore 2 (lega 1, 4, 6, 12, 13). Gli andamenti ottenuti sono stati determinati considerando tutte le leghe indipendentemente se contenevano affinatore 1 o affinatore 2.

In generale le proprietà meccaniche delle leghe per deformazione plastica risultano maggiori rispetto alle leghe per microfusione.

Il carico di snervamento sembra crescere in funzione del contenuto d'argento mentre il carico di rottura risulta più stabile (sembra avere incrementi minori). In realtà non si è ottenuto un andamento chiaro come per le leghe per microfusione ma dati in un ampio range di valori e non è possibile effettuare osservazioni puntuali che permettano di correlare in maniera univoca le proprietà con la composizione chimica.

In Figura 26 è riportato il grafico relativo all'allungamento in funzione del contenuto d'argento; anche in questo caso le stelline indicano l'affinatore 2 e i quadrati le leghe con affinatore 1. Come per le proprietà meccaniche non si riescono a correlare i dati ottenuti con la variazione del contenuto d'argento e nemmeno con la tipologia di affinatore presente.

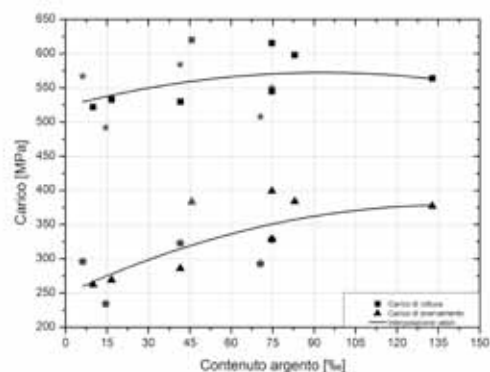


Figura 25 – Variazione del carico di rottura e di snervamento dopo ricottura in funzione del contenuto d'argento

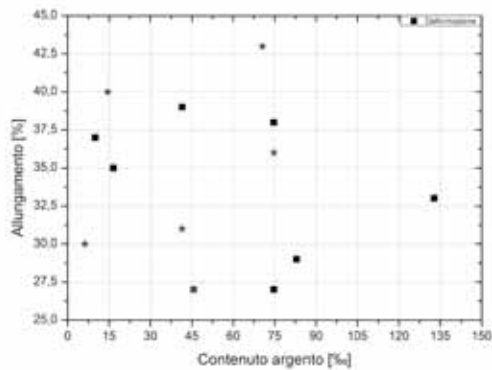


Figura 26 – Variazione dell'allungamento dopo ricottura in funzione del contenuto d'argento

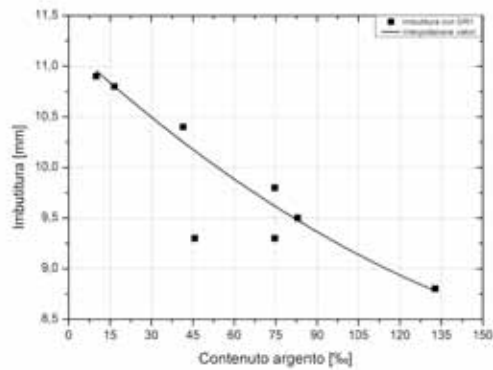


Figura 28 – Variazione dell'imbutitura con affinatore in funzione del contenuto d'argento

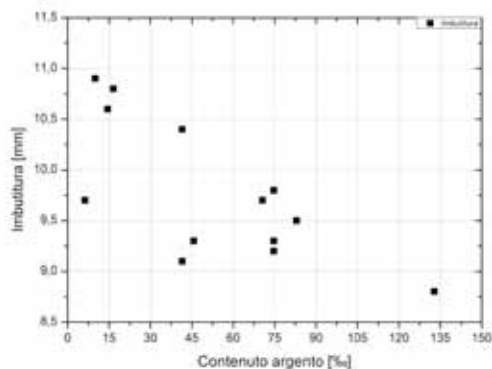


Figura 27 – Variazione dell'imbutitura in funzione del contenuto d'argento

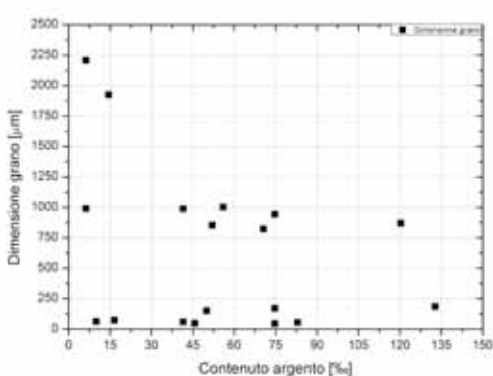


Figura 29 – Variazione della dimensione del grano in funzione del contenuto d'argento

Passando ad analizzare l'imbutitura in generale si può affermare che al crescere del contenuto d'argento l'imbutibilità diminuisce. Non si riesce a tracciare un andamento chiaro ma ciò dipende anche dal fatto che l'imbutibilità è influenzata da molteplici fattori come più volte evidenziato, quali per esempio il contenuto di zinco e la dimensione del grano. Per tale ragione si è provato a costruire un grafico, in Figura 28, della prova Erichsen solo per le leghe con affinatore 1.

Tenuto conto che si tratta di dati sperimentali possiamo affermare che le leghe con affinatore del grano 1 (dunque con struttura cristallina molto vicina) tendono a diminuire la loro imbutibilità all'aumentare del contenuto d'argento, come è evidente nel grafico in Figura 28 (il valore più lontano dall'andamento calcolato è quello relativo alla lega 8 che risulta essere quella con il maggiore contenuto di zinco ma allo stesso tempo quella che presenta il grano più piccolo). Lo scostamento dei dati è da attribuire al diverso contenuto di zinco nelle varie leghe.

Per quanto riguarda la dimensione del grano cristallino valgono esattamente le stesse considerazioni fatte per il 14 ct giallo. In sintesi le leghe con affinatore 1 risultano ben affinate ad esclusione della lega 10 che però oltre all'affinatore 1 presenta anche un elemento disossidante il quale tende a far crescere il grano; da notare che anche la lega 9 contiene affinatore e disossidante ma presenta grano fine in quanto il contenuto di affinatore nella lega 10 è molto più basso rispetto tutte le altre leghe con affinatore 1. L'affinatore 2 dopo fusione non sembra lavorare mentre le leghe con disossidante presentano il grano più grande in assoluto. Abbiamo verificato per via pratica quanto ci aspettavamo dalla teoria.

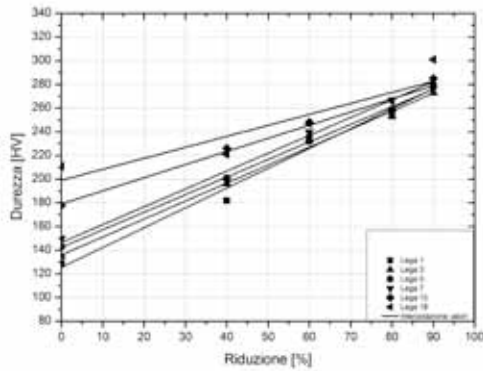


Figura 30 – Curve incrudimento per oro rosso 14 ct

Le curve di incrudimento hanno messo in evidenza che all'aumentare del contenuto d'argento nella lega si ha un incremento della durezza, in accordo con gli andamenti osservati per le durezze nel grafico di Figura 22. Anche in questo caso sono state riportate le curve solo di alcune leghe (1, 3, 5, 7, 15, 18) in modo da apprezzarne l'andamento.

Leghe d'oro bianco 14 ct

Le leghe d'oro bianco analizzate e riportate in Tabella 3 sono 17. Tali leghe sono state ordinate in ordine crescente rispettivamente in funzione del contenuto di nichel e zinco.

Tabella 3 – Leghe d'oro bianco 14 ct analizzate

Campione	Au	Ni	Zn	Ag	Cu	GR1	GR2	Disossidanti
Lega 1	585	41,5	41,5		Balance		X	
Lega 2	585	41,5	62,25		Balance	X		X
Lega 3	585	49,8	83		Balance			X
Lega 4	585	62,25	41,5	62,25	Balance			X
Lega 5	585	62,25	62,25		Balance		X	
Lega 6	585	62,25	62,25	62,25	Balance			X
Lega 7	585	62,25	103,75		Balance			X
Lega 8	585	62,26	33,2	41,5	Balance	X		
Lega 9	585	62,363	62,25		Balance	X		X
Lega 10	585	62,454	58,1		Balance	X		
Lega 11	585	62,505	58,1		Balance	X		X
Lega 12	585	80	70	30	Balance	X		X
Lega 13	585	83	49,8		Balance		X	
Lega 14	585	83	74,7		Balance			X
Lega 15	585	83,204	58,1		Balance	X		
Lega 16	585	83,255	58,1		Balance	X		X
Lega 17	585	84,594	74,7		Balance	X		X

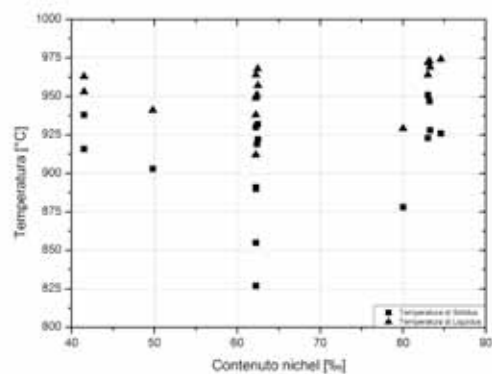


Figura 31 – Variazione della temperatura di Solidus e Liquidus in funzione del contenuto di nichel

Analizzando tutti i dati disponibili non si riesce a trovare un andamento per quanto riguarda la temperatura di Solidus e Liquidus. Bisogna osservare però che le leghe in questione presentano delle composizioni sensibilmente diverse tra loro. Nello specifico ci sono delle leghe per oro bianco a base nichel con argento senza contare che il contenuto di zinco risulta molto diverso tra le varie composizioni. Questo non permette di effettuare particolari osservazioni al riguardo dell'intervallo di fusione osservando il grafico in Figura 31. Possiamo però effettuare delle osservazioni di carattere generale analizzando i dati singolarmente. Ad esempio per le leghe 4, 6, 8 e 12 possiamo dire che l'argento tende a far diminuire la temperatura di Solidus e in maniera minore quella di Liquidus (di conseguenza tende ad ampliare l'intervallo di fusione rispetto ad una lega senza argento). A parità di contenuto di zinco la temperatura di Liquidus tende a crescere con il crescere del contenuto di nichel (per esempio le leghe 2, 5, 10, 15, dove il contenuto di zinco è diverso ma non di molto); a parità di contenuto di nichel la temperatura di Solidus tende a diminuire maggiormente rispetto alla temperatura di Liquidus al crescere del contenuto di zinco e dunque aumenta l'intervallo di fusione (fenomeno meno marcato di quello osservato nell'argento, per esempio leghe 1, 2, leghe 5, 7, 10, leghe 13, 14).

Anche l'analisi della densità risente del fatto che abbiamo composizioni molto diverse tra loro. Possiamo escludere le quattro leghe con argento, che ovviamente presentano una densità più elevata rispetto alle altre leghe, i relativi dati sono rappresentati con delle stelline nel grafico in Figura 32. A nostro avviso si può considerare costante il valore della densità al variare del contenuto di nichel. Di fatto dal grafico si vede che abbiamo una variazione massima della densità tra le varie leghe senza argento inferiore a $0,2 \text{ g/cm}^3$ (valore leggermente superiore all'incertezza di misura del metodo). Questo, assieme al fatto di avere leghe a diverso contenuto di zinco, ci porta a considerare la densità costante al variare del contenuto di nichel. Per lo stesso motivo possiamo affermare che lo zinco contribuisce in maniera trascurabile alla variazione della densità.

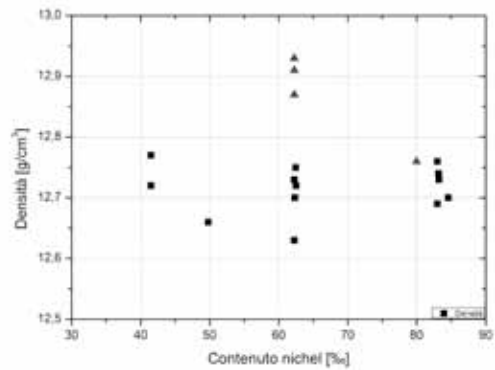


Figura 32 – Variazione della densità in funzione del contenuto di nichel

Per quanto riguarda l'andamento delle coordinate L^* , a^* e b^* si sono ottenuti i grafici delle figure 33, 34, 35, 36.

Per la coordinata L^* non si riesce a trovare un andamento in funzione del contenuto di nichel. Sembra che L^* sia maggiormente influenzata dal contenuto di zinco ma anche se si analizzano i dati di L^* in funzione del contenuto di zinco non si riesce a ricavare un andamento soddisfacente. Si è provato a verificare se esista una correlazione tra L^* e la somma di nichel e zinco (e anche tra nichel e il doppio dello zinco) ma non si è ricavato nulla. Non vengono riportati quest'ultimi due grafici in quanto non interessanti. Possiamo solo affermare che a parità di nichel L^* sembra aumentare al crescere del contenuto di zinco. Con le stelline sono indicate le leghe che contengono anche dell'argento.

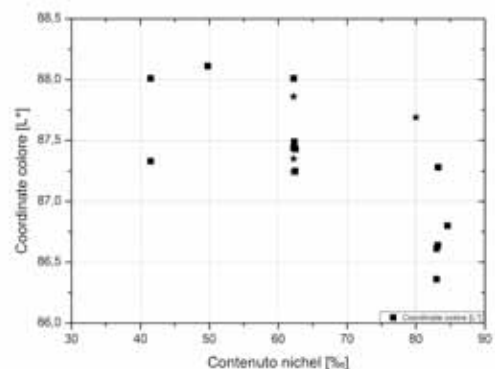


Figura 33 – Variazione coordinate colore L^* in funzione del contenuto di nichel

Per quanto riguarda la coordinata a^* , in Figura 34, sembra che diminuisca all'aumentare del contenuto di nichel. E' evidente che a^* è influenzata anche dal contenuto di zinco per cui si è provato a vedere l'andamento in funzione del contenuto di nichel sommato al contenuto di zinco (che equivarrebbe a considerare il contenuto di rame). Con le stelline sono state indicate le leghe con argen-

to, non considerate nell'interpolazione nel successivo grafico in Figura 35.

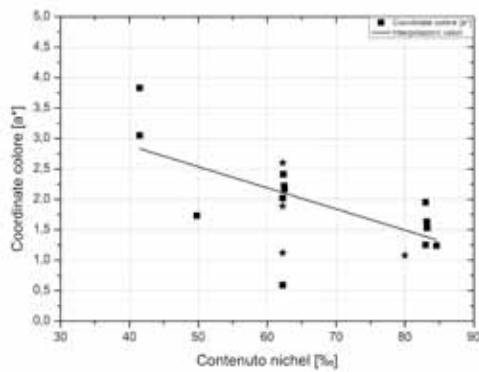


Figura 34 – Coordinate colore a* in funzione del contenuto di nichel

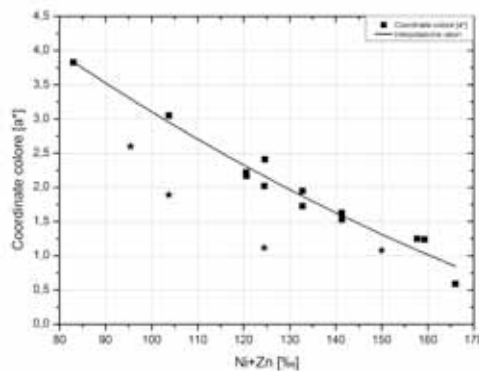


Figura 35 – Coordinate colore a* in funzione del contenuto di nichel e di zinco

E' chiaro che all'aumentare della somma di nichel e zinco la tonalità di colore riferita ad a* tende a spostarsi verso il colore verde (o forse è meglio dire che tende ad essere meno rossa).

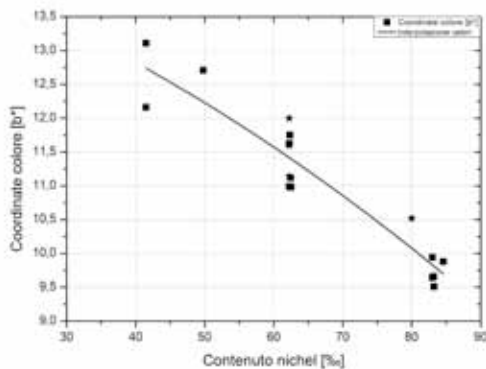


Figura 36 – Variazione coordinate colore b* in funzione del contenuto di nichel

Il valore di b* invece mostra un certo andamento in funzione del contenuto di nichel (b* diminuisce al crescere del contenuto di nichel). Come per L* probabilmente anche b* è influenzato dal contenuto di zinco anche se non si riesce a trovare nessun anda-

mento sia analizzando i dati in funzione della somma di nichel e zinco oppure della somma di nichel e doppio dello zinco (questi ultimi due grafici non vengono riportati in quanto non rappresentativi). Come per l'oro colorato si è analizzato l'andamento della durezza dopo trattamento termico di solubilizzazione e dopo trattamento termico di indurimento (Figura 37). Possiamo affermare che in generale la durezza tende a crescere all'aumentare del contenuto di nichel. E' altresì evidente come poche leghe risultano essere indurenti. A nostro avviso possiamo considerare indurenti solo la lega 4 e la lega 6 che presentano un contenuto di argento di 62,25%. Le altre due leghe con argento (lega 8 e lega 12) non si possono considerare indurenti in quanto la differenza di durezza dopo indurimento risulta inferiore al 20% nel caso della lega 8 e inferiore al 10% nel caso della lega 12 (rispetto al campione solubilizzato). Nessuna altra lega mostra un incremento di durezza dopo indurimento. Si ritiene che il meccanismo di indurimento sia lo stesso che avviene nell'oro colorato (a base argento), il fatto che nel caso dell'oro bianco sembra sia necessario meno argento si attribuisce alla differente composizione di partenza (quest'ultime sono leghe a base nichel). Anche nel caso dell'oro bianco 14ct l'indurimento è dovuto esclusivamente alla precipitazione di una seconda fase ricca in argento.

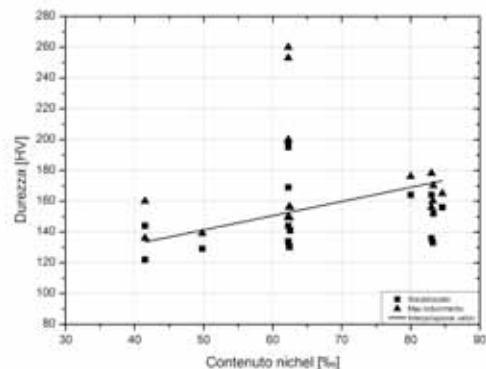


Figura 37 – Variazione della durezza solubilizzato e della durezza indurito in funzione della composizione di nichel

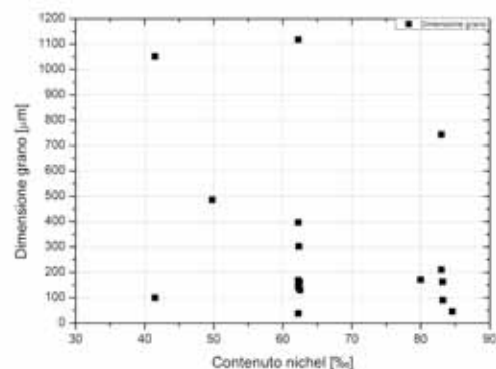


Figura 38 – Variazione della dimensione del grano in funzione del contenuto di nichel

Per quanto riguarda la dimensione del grano le leghe con il grano maggiore risultano essere quelle contenenti solamente l'elemento disossidante. Anche le leghe con l'affinatore 2 presentano un grano sensibilmente maggiore rispetto alle leghe con l'affinatore 1. Quando si utilizza l'affinatore 1 assieme al disossidante il grano risulta del tutto comparabile (stesso ordine di grandezza per quanto riguarda le dimensioni) con il grano delle leghe solo con affinatore 1. Rispetto al 18 ct, non si è osservato una diminuzione del grano al crescere del contenuto di nichel e disossidante, nel 14 ct si ritiene che l'elemento disossidante sia responsabile solo della crescita del grano.

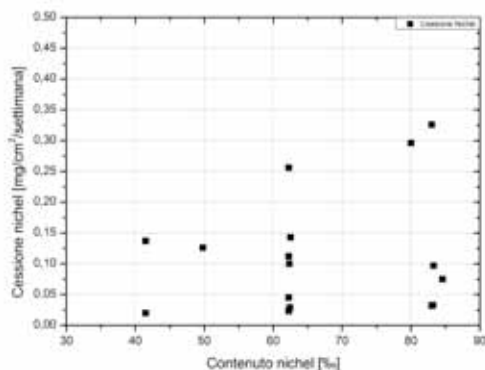


Figura 39 – Variazione della cessione di nichel in funzione del contenuto di nichel

Il grafico soprastante, Figura 39, è relativo alla cessione nichel. Come per il 18 ct bianco la presenza di disossidanti amplifica notevolmente la cessione nichel. Le leghe con cessioni maggiori sono quelle che presentano disossidanti nella loro composizione. Le leghe con affinatore presentano valori di cessione inferiori a parità di composizione confermando l'effetto benefico dell'affinazione del grano sulla cessione del nichel. L'inserimento di argento invece non sembra giovare in modo particolare sui valori di cessione (se non nel caso della lega 8, che risulta essere l'unica con argento senza disossidanti). Si potrebbe anche supporre che l'effetto negativo dei disossidanti sia maggiore dell'effetto positivo dell'argento (almeno in 18 ct si era osservato che l'argento riduceva la cessione di nichel). Confermiamo anche in questo caso che la cessione di nichel dipende dal contenuto di nichel ma non è funzione solo di questo.

Leghe d'oro bianco 14 ct in microfusione

Le leghe in 14 ct adatte al processo di microfusione sono undici, precisamente la lega 2, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 14, 16, 17. Abbiamo considerato leghe adatte al processo di microfusione solo le leghe contenenti almeno un elemento disossidante (può essere presente o meno l'affinatore 1).

Per quanto riguarda il carico di rottura e lo snervamento in generale si può dire che al crescere del nichel aumentano entrambi. Si evidenzia che le quattro leghe con argento (rappresentate nel grafico con la stellina) tendono ad avere carichi di rottura e di snervamento maggiori dell'ipotetica lega senza argento (con la stessa composizione di massima). Quest'ultime non sono state prese in considerazione nell'interpolazione riportata nel grafico.

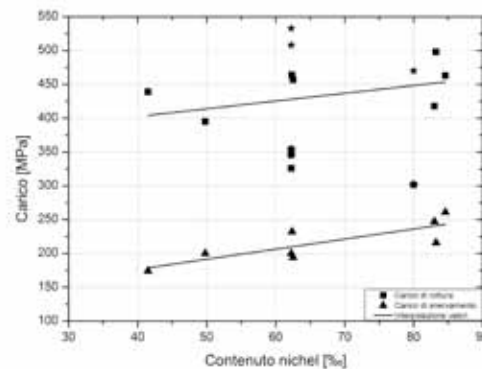


Figura 40 – Variazione del carico di rottura e di snervamento dopo fusione in funzione del contenuto di nichel

Confrontando i valori ottenuti tra loro emerge inoltre che le leghe con affinatore mediamente presentano carichi di rottura e di snervamento superiori alle leghe con solo disossidante.

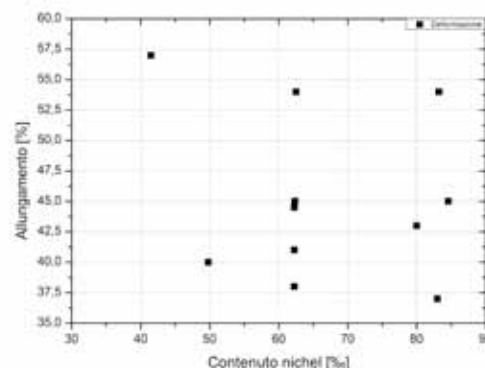


Figura 41 – Variazione dell'allungamento dopo fusione in funzione del contenuto di nichel

Non si riesce a tracciare un andamento univoco nemmeno per la deformazione dopo fusione in

Figura 41. Possiamo osservare che le leghe con solo l'elemento disossidante sono quelle che presentano gli allungamenti dopo fusione più bassi. Al crescere del contenuto di nichel si ha una tendenza alla riduzione dell'allungamento. L'argento, invece, non sembra influenzare più di tanto l'allungamento.

Leghe doro bianco 14 ct in deformazione

Le leghe in 14 ct adatte al processo di deformazione plastica sono undici, vale a dire le leghe 1, 2, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17. In questo caso sono state considerate adatte alla deformazione le leghe contenenti almeno un affinatore (con la possibilità di avere anche la contemporanea presenza dell'elemento disossidante). Per le leghe per deformazione plastica sono stati rilevate oltre alle proprietà meccaniche anche l'imbutibilità, e la curva di incrudimento.

Per quanto riguarda il carico di rottura e di snervamento dopo ricottura sembrano, come nel caso dopo fusione, crescere con il contenuto di nichel. Si osserva un comportamento dipendente fortemente dalle aggiunte degli elementi affinati o disossidanti. Nello specifico sembra ci sia una notevole differenza tra le leghe con affinatore e disossidante, che presentano i carichi di rottura e snervamento maggiori, e le leghe con solo affinatore come si può osservare nel grafico in Figura 42. Come nelle leghe per microfusione, quelle contenenti argento presentano delle proprietà meccaniche superiori. L'argento insomma sembra incrementare le proprietà meccaniche delle leghe bianche al nichel. Anche in questo caso le leghe con argento sono rappresentate nel grafico con la stellina e pentagono.

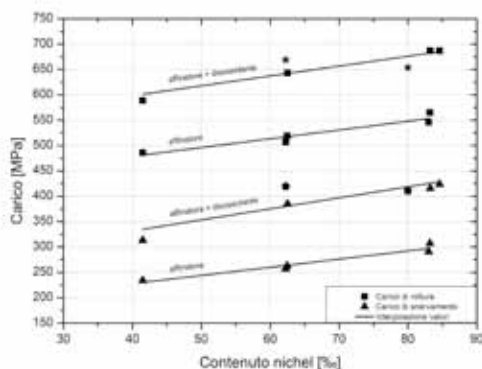


Figura 42 – Variazione del carico di rottura e di snervamento dopo ricottura in funzione del contenuto di nichel

L'allungamento dopo ricottura ha messo in evidenza lo stesso andamento osservato nel grafico prece-

dente, vale a dire che le leghe con solo affinatore (indipendentemente che sia affinatore 1 o 2) presentano degli allungamenti maggiori rispetto alle leghe con affinatore e disossidante. L'andamento dell'allungamento tra i due gruppi tende a diminuire all'aumentare del contenuto di nichel. Le leghe con solo affinatore 2, a parità di composizione, presentano un allungamento leggermente maggiore rispetto alle leghe con solo affinatore 1.

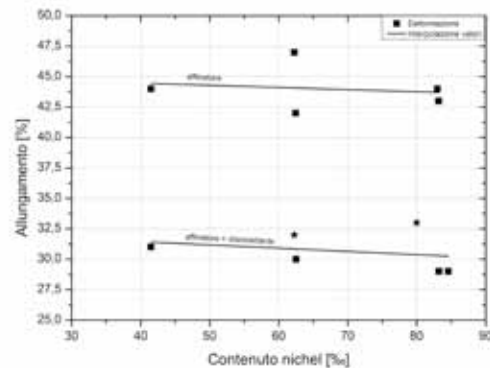


Figura 43 – Variazione dell'allungamento dopo ricottura in funzione del contenuto di nichel

L'andamento della prova Erichsen a nostro avviso è una conferma di quanto visto con i dati di trazione. Le leghe che presentano valori più alti di imbutibilità sono quelle con affinatore (sempre indipendentemente che sia affinatore 1 o 2) mentre le leghe con affinatore e disossidante presentano le frecce inferiori. All'aumentare del contenuto di nichel l'imbutibilità tende a diminuire. Le leghe con argento sono quelle che presentano i valori della prova Erichsen più bassi, indicate nel grafico in Figura 44 sottostante con la stellina.

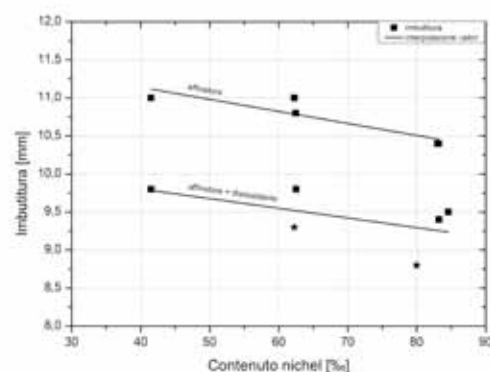


Figura 44 – Variazione dell'imbutitura in funzione del contenuto di nichel

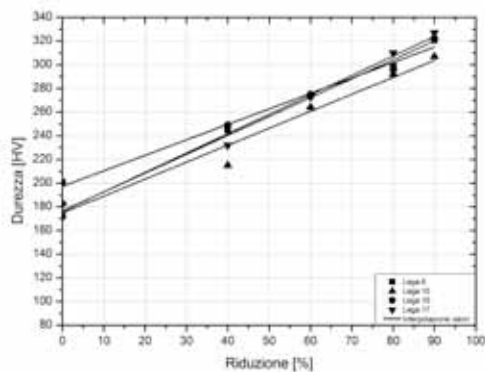


Figura 45 – Curve incrudimento per oro bianco 14 ct

Le curve di incrudimento presentano lo stesso andamento osservato per il 18 ct, vale a dire che all'aumentare del contenuto di nichel il materiale tende a incrudirsi maggiormente. Nel grafico in Figura 45 abbiamo rappresentato le leghe 8, 10, 15, 17.

Conclusioni

Come già anticipato lo scorso anno in questo lavoro sono stati presentati i dati relativi al 14 ct. Possiamo affermare che i dati raccolti rispecchiano abbastanza quanto si era osservato nella pratica quotidiana. Chiaramente c'è qualche eccezione e bisognerà effettuare qualche composizione su misura per comprendere se taluni dati sono indice di un andamento particolare oppure dei punti singolari. L'oro bianco sembra essere la parte su cui bisogna dedicare maggior tempo (con altre prove) in quanto in molti casi non siamo stati in grado di trovare delle correlazioni tra le varie composizioni. Riteniamo comunque che già a questo livello di informazioni questi dati ci permettano di scegliere la composizione più adatta all'applicazione richiesta.

Bibliografia

“Properties and Selection: Non ferrous Alloys and Special-Purpose Materials,” *ASM Handbook 2*.

Dieter Ott, “Influence of Small Additions and Impurities on Gold and Jewelry Gold Alloys,” *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 1997*, ed. Dave Schneller (LaFayette, CO: Met-Chem Research, 1997): 173-196.

A. S. McDonald and G. H. Sistare, “The Metallurgy of Some Carat Gold Jewellery Alloys,” *Gold Bulletin 11*, no. 3 (1978): 66-73.

W. S. Rapson, “The Metallurgy of the Coloured Ca-

rat Gold Alloys,” *Gold Bulletin 23*, no. 4 (1990): 125-133.

W. S. Rapson and T. Groenewald, *Gold Usage* (Academic Press, 1978).

L.S. Benner, T. Suzuki, K. Meguro and S. Tanaka, *Precious Metals and Technology* (International Precious Metals Institute).