



# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica

## FIRE INVESTIGATION DI LAMIERE IN AISI 316L PER TUBOLARI DI CANNE FUMARIE. STUDIO DELL'ALTERAZIONE TERMICA E DEGLI OSSIDI SUPERFICIALI

Relatore: prof. Marco BONIARDI  
Co-relatore: ing. Andrea CASAROLI

Tesi di Laurea di:  
Andrea COSTA Matr. 739951

Anno Accademico 2010/11

# *Indice generale*

1	<b>1. L'INCENDIO E GLI ATTUALI METODI DI INVESTIGAZIONE</b>
1	1.1 L'incendio
7	1.2 Metodi di investigazione attuali
7	1.2.1 Cause di innesco
10	1.2.2 Punto di origine e percorso seguito dalla fiamma
18	1.2.3 Temperature raggiunte
20	1.3 Bibliografia
21	<b>2. IL CAMINO E LA CANNA FUMARIA</b>
21	2.1 Introduzione
23	2.2 Evoluzione del camino
28	2.3 Funzionamento del camino
28	2.3.1 Generalità
28	2.3.2 Funzione della canna fumaria
29	2.3.3 Teoria elementare del camino
36	2.4 Progettazione del camino
36	2.4.1 Calcolo del tiraggio naturale
37	2.4.2 Calcolo delle perdite di carico
42	2.4.3 Tiraggio disponibile e massa dei fumi
43	2.4.4 Difetti del tiraggio
49	2.4.5 Soluzioni pratiche e costruttive
49	2.4.5.1 Eccesso di tiraggio
50	2.4.5.2 Scarso tiraggio
52	2.4.5.3 Correggere i difetti di esposizione e costruzione
52	2.4.5.4 Compensare i problemi architettonici
53	2.4.5.5 Evitare il cattivo combustibile
53	2.5 Collocazione del camino e della canna fumaria
54	2.6 Rischio incendio nel camino e nella canna fumaria
54	2.6.1 Problemi di installazione
55	2.6.2 Prevenzione
57	2.7 Bibliografia
58	<b>3. ACCIAI INOSSIDABILI</b>

58	<b>3.1</b>	Generalità
59	<b>3.2</b>	Classi di acciai inossidabili
62	<b>3.2.1</b>	Acciai inossidabili martensitici
63	<b>3.2.2</b>	Acciai inossidabili ferritici
64	<b>3.2.3</b>	Acciai inossidabili duplex
66	<b>3.3</b>	Acciai inossidabili austenitici
66	<b>3.3.1</b>	Tipi di acciai inossidabili austenitici
67	<b>3.3.2</b>	Trattamenti termici
68	<b>3.3.3</b>	Proprietà meccaniche e fisiche
73	<b>3.4</b>	Bibliografia
74	<b>4.</b>	<b>ANALISI DELLE LAMIERE PER TUBOLARI DI CANNE FUMARIE</b>
74	<b>4.1</b>	Introduzione
76	<b>4.2</b>	Programma degli esperimenti
76	<b>4.2.1</b>	Riscaldamento campioni
78	<b>4.2.2</b>	Analisi fotografica: light box e fotocamere
82	<b>4.2.3</b>	Analisi fotografica: fotografie e istogrammi RGB
193	<b>4.2.4</b>	Analisi fotografica: ANOVA
193	<b>4.2.4.1</b>	Analisi della media del canale rosso
198	<b>4.2.4.2</b>	Analisi della deviazione standard del canale rosso
200	<b>4.2.4.3</b>	Analisi della media del canale verde
205	<b>4.2.4.4</b>	Analisi della deviazione standard del canale verde
207	<b>4.2.4.5</b>	Analisi della media del canale blu
211	<b>4.2.4.6</b>	Analisi della deviazione standard del canale blu
213	<b>4.3</b>	Bibliografia
214	<b>5.</b>	<b>ANALISI STRUTTURA CRISTALLINA E OSSIDI SUPERFICIALI</b>
214	<b>5.1</b>	Analisi struttura cristallina
234	<b>5.2</b>	Analisi ossidi superficiali
246	<b>5.3</b>	Bibliografia
247	<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONI</b>
247	<b>6.1</b>	Considerazioni finali
250	<b>Allegato A</b>	

## *Indice delle tabelle*

2	1.1	Esempi di materiali attribuibili alle quattro classi di fuoco
18	1.2	Temperature di fusione dei metalli che più comunemente vengono ritrovati sul luogo di un incendio
36	2.1	Prodotti di combustione della legna con relativa densità
38	2.2	Conducibilità termica dei materiali costituenti le canne fumarie
40	2.3	Valori di rugosità dei materiali costituenti le canne fumarie
41	2.4	Valori del parametro $r$ al variare della geometria del condotto
63	3.1	Composizione e caratteristiche dei principali acciai inossidabili martensitici
64	3.2	Composizione e caratteristiche dei principali acciai inossidabili ferritici
69	3.3	Valori medi delle proprietà fisiche degli acciai austenitici
75	4.1	Tabella indicativa dei colori della British Stainless Steel Association
77	4.2	Nomenclatura dei campioni
78	4.3	Sequenza di riscaldamento
87	4.4	Sequenza di scatto
194	4.5	Tabella ANOVA della media del canale rosso rispetto alle repliche
196	4.6	Tabella ANOVA della media del canale rosso rispetto a temperatura, tempo e fotocamera
198	4.7	Tabella riassuntiva del test di Tukey per il canale rosso
200	4.8	Tabella ANOVA della deviazione standard del canale rosso rispetto a temperatura, tempo e fotocamera
201	4.9	Tabella ANOVA della media del canale verde rispetto alle repliche
203	4.10	Tabella ANOVA della media del canale verde rispetto a temperatura, tempo e fotocamera
205	4.11	Tabella riassuntiva del test di Tukey per il canale verde
206	4.12	Tabella ANOVA della deviazione standard del canale verde rispetto a temperatura, tempo e fotocamera
207	4.13	Tabella ANOVA della media del canale blu rispetto alle repliche
209	4.14	Tabella ANOVA della media del canale blu rispetto a temperatura, tempo e fotocamera
211	4.15	Tabella riassuntiva del test di Tukey per il canale blu
212	4.16	Tabella ANOVA della deviazione standard del canale blu rispetto a temperatura, tempo e fotocamera
233	5.1	Riferimenti massimi e minimi degli elementi chimici per un acciaio AISI 316L
234	5.2	Composizione chimica dei campioni
244	5.3	Analisi chimica (EDS) dei campioni riscaldati per 1 ora
245	5.4	Analisi chimica (EDS) dei campioni riscaldati per 6 ore

## *Indice delle figure*

4	1.1	Fase iniziale dell'incendio
5	1.2	Fase di estensione dell'incendio
5	1.3	Incendio in corrispondenza del flash over
6	1.4	Fase di incendio generalizzato
6	1.5	Andamento dell'HRR in un incendio in locale chiuso
8	1.6	Esempio di trailer patterns
8	1.7	Esempio di pool-shaped patterns
9	1.8	Esempio di irregular patterns
9	1.9	Esempio di doughnut-shaped patterns
10	1.10	Fori creati da fiamme provenienti dal basso (disegno superiore) e dall'alto (disegno inferiore)
11	1.11	Esempio di pulled light bulb generato da una sorgente di calore posizionata a sinistra
11	1.12	Esempi di spalling
13	1.13	Misurazione della profondità della zona carbonizzata
14	1.14	Esempio di clean burn
16	1.15	Traccia a cono ribaltato (a), a clessidra (b), a U (c) e a V (d)
17	1.16	Effetto della base della fiamma sulla larghezza del fire plumes
17	1.17	Tracce a freccia
18	1.18	Esempio di diagramma a vettori della fiamma
22	2.1	Esempio di caminetto dopo un incendio
24	2.2	Camino medievale in muratura
25	2.3	Benjamin Franklin
26	2.4	Caminetto di Pennsylvania
27	2.5	Caminetto moderno
30	2.6	Camini in equilibrio statico
30	2.7	Aumento di energia nella colonna A
30	2.8	Principio di funzionamento del camino
32	2.9	Schematizzazione del camino
34	2.10	Schema di funzionamento del sistema camino-canna fumaria
44	2.11	Esempi di angolazione del vento
45	2.12	Zone di depressione o sovrappressione in funzione dell'orientamento geografico
45	2.13	Zone di depressione o sovrappressione all'interno dell'abitazione

47	2.14	Esempio di proporzionamento degli elementi del sistema camino
48	2.15	Nomenclatura degli elementi del sistema camino
50	2.16	Esempio di moderatore di tiraggio
50	2.17	Esempio di comignolo
51	2.18	Soluzioni costruttive dei comignoli
51	2.19	Esempi di zone di reflusso in funzione dell'inclinazione dei tetti
52	2.20	Zona di reflusso per un tetto piano
58	3.1	Curva di Tamman
59	3.2	Diagramma di stato Fe-Cr e diagramma di stato Fe-Ni
60	3.3	Diagramma di Schaeffler
62	3.4	Classi degli acciai inossidabili in funzione del contenuto di Cr e Ni
62	3.5	Classi degli acciai inossidabili in funzione del contenuto di Cr e C
65	3.6	Confronto tra classi di acciai inossidabili
70	3.7	Andamento della caratteristiche meccaniche in funzione del grado di incrudimento (AISI 316)
70	3.8	Proprietà meccaniche a temperature inferiori a quella ambiente
72	3.9	Valori delle prove di scorrimento viscoso per vari tipi di acciai austenitici
79	4.1	Immagine e dimensioni di ingombro del light box
79	4.2	Immagine della fotocamera Canon Eos 450D
80	4.3	Immagine della fotocamera Nikon D300
81	4.4	Target del bilanciamento del bianco e del colore
81	4.5	Target del bilanciamento colore per ritratti e paesaggi
89	4.6	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 1)
89	4.7	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 2)
89	4.8	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 3)
89	4.9	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 4)
90	4.10	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 1)
90	4.11	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 2)
90	4.12	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 3)
90	4.13	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 4)
91	4.14	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 1)
91	4.15	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 2)
91	4.16	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 3)
91	4.17	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 4)
92	4.18	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 1)
92	4.19	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 2)
92	4.20	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 3)
92	4.21	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 4)
93	4.22	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 1)
93	4.23	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 2)
93	4.24	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 3)

93	4.25	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 4)
94	4.26	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 1)
94	4.27	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 2)
94	4.28	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 3)
94	4.29	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 4)
95	4.30	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 1)
95	4.31	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 2)
95	4.32	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 3)
95	4.33	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 4)
96	4.34	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 1)
96	4.35	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 2)
96	4.36	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 3)
96	4.37	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 4)
97	4.38	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 1)
97	4.39	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 2)
97	4.40	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 3)
97	4.41	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 4)
98	4.42	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 1)
98	4.43	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 2)
98	4.44	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 3)
98	4.45	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 4)
99	4.46	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 1)
99	4.47	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 2)
99	4.48	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 3)
99	4.49	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 4)
100	4.50	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 1)
100	4.51	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 2)
100	4.52	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 3)
100	4.53	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 4)
101	4.54	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 1)
101	4.55	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 2)
101	4.56	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 3)
101	4.57	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 4)
102	4.58	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 1)
102	4.59	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 2)
102	4.60	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 3)
102	4.61	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 4)
103	4.62	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 1)
103	4.63	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 2)
103	4.64	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 3)

103	4.65	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 4)
104	4.66	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 1)
104	4.67	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 2)
104	4.68	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 3)
104	4.69	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 4)
105	4.70	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 1)
105	4.71	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 2)
105	4.72	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 3)
105	4.73	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 4)
106	4.74	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 1)
106	4.75	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 2)
106	4.76	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 3)
106	4.77	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 4)
107	4.78	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 1)
107	4.79	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 2)
107	4.80	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 3)
107	4.81	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 4)
108	4.82	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 1)
108	4.83	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 2)
108	4.84	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 3)
108	4.85	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 4)
109	4.86	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 1)
109	4.87	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 2)
109	4.88	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 3)
109	4.89	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 4)
110	4.90	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 1)
110	4.91	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 2)
110	4.92	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 3)
110	4.93	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 4)
111	4.94	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 1)
111	4.95	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 2)
111	4.96	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 3)
111	4.97	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 4)
112	4.98	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 1)
112	4.99	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 2)
112	4.100	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 3)
112	4.101	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 4)
113	4.102	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-A (campione 1)
113	4.103	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-A (campione 2)
113	4.104	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-A (campione 3)

















183	4.385	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-A (campione 4)
184	4.386	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 1)
184	4.387	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 2)
184	4.388	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 3)
184	4.389	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 4)
185	4.390	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 1)
185	4.391	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 2)
185	4.392	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 3)
185	4.393	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 4)
186	4.394	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 1)
186	4.395	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 2)
186	4.396	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 3)
186	4.397	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 4)
187	4.398	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 1)
187	4.399	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 2)
187	4.400	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 3)
187	4.401	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 4)
188	4.402	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 1)
188	4.403	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 2)
188	4.404	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 3)
188	4.405	Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 4)
189	4.406	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 1)
189	4.407	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 2)
189	4.408	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 3)
189	4.409	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 4)
190	4.410	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 1)
190	4.411	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 2)
190	4.412	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 3)
190	4.413	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 4)
191	4.414	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 1)
191	4.415	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 2)
191	4.416	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 3)
191	4.417	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 4)
192	4.418	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 1)
192	4.419	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 2)
192	4.420	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 3)
192	4.421	Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 4)
193	4.422	Grafico dei valori della media del canale rosso rispetto al fattore
194	4.423	Grafico dei valori della media rispetto all'effetto principale
194	4.424	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e al fattore



195	4.425	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
195	4.426	Grafico dei valori della media del canale rosso rispetto ai fattori
196	4.427	Grafico dei valori della media rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b)
197	4.428	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori
197	4.429	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
199	4.430	Grafico dei valori della deviazione standard del canale rosso rispetto ai fattori
199	4.431	Grafico dei valori della deviazione standard rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b)
200	4.432	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori
200	4.433	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
201	4.434	Grafico dei valori della media del canale verde rispetto al fattore
201	4.435	Grafico dei valori della media rispetto all'effetto principale
202	4.436	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e al fattore
202	4.437	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
202	4.438	Grafico dei valori della media del canale verde rispetto ai fattori
203	4.439	Grafico dei valori della media rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b)
203	4.440	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori
204	4.441	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
205	4.442	Grafico dei valori della deviazione standard del canale verde rispetto ai fattori
205	4.443	Grafico dei valori della deviazione standard rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b)
206	4.444	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori
206	4.445	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
207	4.446	Grafico dei valori della media del canale blu rispetto al fattore
207	4.447	Grafico dei valori della media rispetto all'effetto principale
208	4.448	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e al fattore
208	4.449	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
208	4.450	Grafico dei valori della media del canale blu rispetto ai fattori
209	4.451	Grafico dei valori della media rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b)
209	4.452	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori
210	4.453	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
211	4.454	Grafico dei valori della deviazione standard del canale blu rispetto ai fattori
211	4.455	Grafico dei valori della deviazione standard rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b)
212	4.456	Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori
212	4.457	Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b)
214	5.1	Ciclo termico di inglobatura
216	5.2	Micrografia longitudinale del campione a 20°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
216	5.3	Micrografia trasversale del campione a 20°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
217	5.4	Micrografia longitudinale del campione a 150°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
217	5.5	Micrografia trasversale del campione a 150°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x

217	5.6	Micrografia longitudinale del campione a 225°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
218	5.7	Micrografia trasversale del campione a 225°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
218	5.8	Micrografia longitudinale del campione a 300°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
218	5.9	Micrografia trasversale del campione a 300°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
219	5.10	Micrografia longitudinale del campione a 340°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
219	5.11	Micrografia trasversale del campione a 340°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
219	5.12	Micrografia longitudinale del campione a 375°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
220	5.13	Micrografia trasversale del campione a 375°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
220	5.14	Micrografia longitudinale del campione a 415°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
220	5.15	Micrografia trasversale del campione a 415°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
221	5.16	Micrografia longitudinale del campione a 450°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
221	5.17	Micrografia trasversale del campione a 450°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
221	5.18	Micrografia longitudinale del campione a 525°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
222	5.19	Micrografia trasversale del campione a 525°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
222	5.20	Micrografia longitudinale del campione a 600°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
222	5.21	Micrografia trasversale del campione a 600°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
223	5.22	Micrografia longitudinale del campione a 750°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
223	5.23	Micrografia trasversale del campione a 750°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
223	5.24	Micrografia longitudinale del campione a 900°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
224	5.25	Micrografia trasversale del campione a 900°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
224	5.26	Micrografia longitudinale del campione a 1050°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
224	5.27	Micrografia trasversale del campione a 1050°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x
225	5.28	Micrografia longitudinale del campione a 20°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
225	5.29	Micrografia trasversale del campione a 20°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
225	5.30	Micrografia longitudinale del campione a 150°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
226	5.31	Micrografia trasversale del campione a 150°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
226	5.32	Micrografia longitudinale del campione a 225°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
226	5.33	Micrografia trasversale del campione a 225°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
227	5.34	Micrografia longitudinale del campione a 300°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
227	5.35	Micrografia trasversale del campione a 300°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
227	5.36	Micrografia longitudinale del campione a 340°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
228	5.37	Micrografia trasversale del campione a 340°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
228	5.38	Micrografia longitudinale del campione a 375°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
228	5.39	Micrografia trasversale del campione a 375°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
229	5.40	Micrografia longitudinale del campione a 415°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
229	5.41	Micrografia trasversale del campione a 415°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
229	5.42	Micrografia longitudinale del campione a 450°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
230	5.43	Micrografia trasversale del campione a 450°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
230	5.44	Micrografia longitudinale del campione a 525°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
230	5.45	Micrografia trasversale del campione a 525°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x

231	5.46	Micrografia longitudinale del campione a 600°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
231	5.47	Micrografia trasversale del campione a 600°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
231	5.48	Micrografia longitudinale del campione a 750°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
232	5.49	Micrografia trasversale del campione a 750°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
232	5.50	Micrografia longitudinale del campione a 900°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
232	5.51	Micrografia trasversale del campione a 900°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
233	5.52	Micrografia longitudinale del campione a 1050°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
233	5.53	Micrografia trasversale del campione a 1050°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x
236	5.54	Aspetto dell'ossido di cromo a 20°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
236	5.55	Aspetto dell'ossido di cromo a 150°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
236	5.56	Aspetto dell'ossido di cromo a 225°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
237	5.57	Aspetto dell'ossido di cromo a 300°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
237	5.58	Aspetto dell'ossido di cromo a 340°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
237	5.59	Aspetto dell'ossido di cromo a 375°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
238	5.60	Aspetto dell'ossido di cromo a 415°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
238	5.61	Aspetto dell'ossido di cromo a 450°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
238	5.62	Aspetto dell'ossido di cromo a 525°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
239	5.63	Aspetto dell'ossido di cromo a 600°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
239	5.64	Aspetto dell'ossido di cromo a 750°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
239	5.65	Aspetto dell'ossido di cromo a 900°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
240	5.66	Aspetto dell'ossido di cromo a 1050°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x
240	5.67	Aspetto dell'ossido di cromo a 20°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
240	5.68	Aspetto dell'ossido di cromo a 150°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
241	5.69	Aspetto dell'ossido di cromo a 225°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
241	5.70	Aspetto dell'ossido di cromo a 300°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
241	5.71	Aspetto dell'ossido di cromo a 340°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
242	5.72	Aspetto dell'ossido di cromo a 375°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
242	5.73	Aspetto dell'ossido di cromo a 415°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
242	5.74	Aspetto dell'ossido di cromo a 450°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
243	5.75	Aspetto dell'ossido di cromo a 525°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
243	5.76	Aspetto dell'ossido di cromo a 600°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
243	5.77	Aspetto dell'ossido di cromo a 750°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
244	5.78	Aspetto dell'ossido di cromo a 900°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
244	5.79	Aspetto dell'ossido di cromo a 1050°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x
245	5.80	Andamento delle percentuali degli elementi di lega in funzione della temperatura (1 ora)
245	5.81	Andamento delle percentuali degli elementi di lega in funzione della temperatura (6 ore)

# L'incendio e gli attuali metodi di investigazione

## 1.1 – L'incendio

L'incendio è una reazione rapida di ossidazione caratterizzata da emissione di energia (calore e luce) e di prodotti della combustione, questi ultimi comprendono:

- ossido di carbonio (CO): gas tossico, spesso presente in grande quantità negli incendi in ambiente chiuso con scarsa ventilazione. L'azione tossica è dovuta al fatto che esso altera la composizione del sangue; l'esposizione in ambiente con l'1,3% di CO, produce incoscienza quasi istantanea (dopo due o tre inalazioni) e la morte dopo pochi minuti. La percentuale dello 0,4% è fatale in meno di un'ora;
- *anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)*: si forma sempre in grande quantità ed è un gas asfissiante che in forte concentrazione provoca anche un'accelerazione del ritmo respiratorio. L'aria che contiene il 3% di CO<sub>2</sub> provoca addirittura il raddoppio del ritmo respiratorio, con la conseguenza che se sono presenti gas tossici ne aumenta la quantità immessa nell'organismo;
- *acido cianidrico*: è un gas altamente tossico, ma negli incendi ordinari si forma solo in modeste quantità. Quantità relativamente apprezzabili se ne trovano nelle combustione incomplete (con scarsità di ossigeno) della lana, della seta, delle resine acriliche, uretaniche e poliamminiche. Ha odore caratteristico di mandorle amare ed una concentrazione dello 0,3% è già da considerare letale;
- *acido cloridrico*: è un prodotto della combustione di tutti quei prodotti che contengono cloro, come la grande maggioranza delle materie plastiche. La concentrazione di 1500 ppm è fatale in pochi minuti. La sua presenza viene facilmente avvertita a causa del suo odore pungente e del suo effetto irritante per le mucose;
- *fosgene*: gas altamente tossico, è presente nella combustione di materiali che contengono cloro, la presenza di tale gas è da temere particolarmente quando la combustione si verifica in luogo chiuso;

– *fumo*: è formato da piccolissime particelle solide, liquide e vapori condensati. Le particelle solide sono costituite da catrami, carbonio ed altre sostanze mentre quelle liquide sono costituite essenzialmente da vapore d'acqua. Quando i fumi si raffreddano al di sotto dei 100°C il vapore condensa dando luogo a dei fumi bianchi, i residui solidi, hanno invece il colore nero.

Affinché si verifichi l'incendio occorre che si combinino tra loro tre elementi essenziali:

- il *combustibile*;
- il *comburente*;
- l'*innesco*.

Il *combustibile* è la sostanza in grado di bruciare in condizioni ambientali normali (convenzionalmente 20°C, 1 atm). Esso può essere:

- solido (carbone, legna, carta, ecc.);
- liquido (benzina, gasolio, alcool, ecc.);
- gassoso (idrogeno, acetilene, metano, ecc.).

Il tipo di combustibile è anche il criterio utilizzato dalla normativa italiana (D.M. 20-12-82 che recepisce la norma EN 2) per classificare gli incendi, che vengono suddivisi in:

- fuochi di classe **A**: di materiali solidi, generalmente di natura organica, la cui combustione avviene normalmente con formazione di braci;
- fuochi di classe **B**: di liquidi o di solidi che possono liquefare;
- fuochi di classe **C**: di gas;
- fuochi di classe **D**: di metalli.

Esempi di materiali attribuibili alle quattro classi di fuoco sono:

Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
carta legna segatura trucioli stoffa rifiuti cere	nafta benzina petrolio alcool oli pesanti vernici gomme	metano cloro gas illuminante acetilene propano idrogeno	magnesio potassio fosforo sodio carburi

Tabella 1.1 – Esempi di materiali attribuibili alle quattro classi di fuoco.

Il *comburente* generalmente è costituito dall'ossigeno contenuto nell'aria allo stato di gas (approssimativamente l'aria può essere composta dal 21% di O<sub>2</sub> e dal 79% di N<sub>2</sub> in volume). Esistono combustibili che bruciano in atmosfere differenti dall'aria e anche sostanze che contengono nella loro molecola una quantità di ossigeno sufficiente per poter bruciare.

L'*innesco* è l'elemento che a contatto con la miscela infiammabile, avvia la reazione di combustione. Esso può essere costituito da una qualunque sorgente di calore:

- fiamme;
- scintille (elettriche, elettrostatiche, prodotte da attriti meccanici, ecc.);
- materiali che si trovano a temperature elevata.

I requisiti normalmente necessari all'innesco per essere efficace sono:

- temperatura superiore a quella di accensione della miscela, dove per temperatura di accensione si intende la minima temperatura alla quale la miscela combustibile-comburente inizia a bruciare spontaneamente ed in modo continuo;
- apporto di energia termica;
- durata nel tempo del contatto.

È corretto precisare che non sempre gli incendi avvengono a causa dell'azione di un innesco; è il caso delle sostanze con grande superficie per unità di peso come quelle granulate o in polvere. Infatti molte sostanze organiche esposte all'aria si ossidano lentamente, ma continuamente. Di conseguenza all'interno dei depositi di materiali (carbone, segatura, ecc.) in pezzatura fine, se la profondità del mucchio è tale da conservare il calore sviluppato dall'ossidazione e se la granulometria della polvere è sufficiente per permettere un adeguato ricambio tra ossigeno e prodotti di ossidazione (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O), si realizza un bilancio tra calore prodotto e smaltito che può essere favorevole al primo, con conseguente innalzamento della temperatura interna del mucchio fino alla sua accensione.

Il processo di combustione può avvenire in due modi differenti:

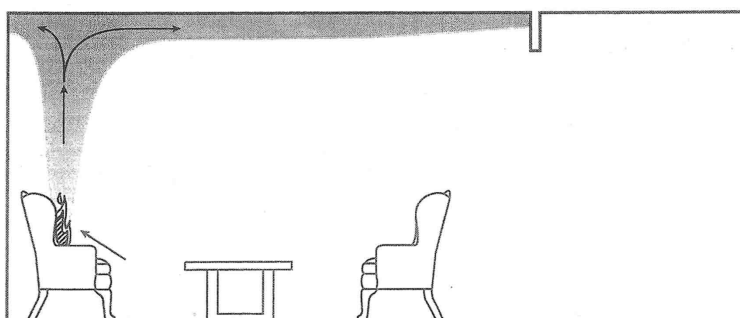
- *combustione senza fiamma superficiale*: ha luogo nei combustibili solidi, in un primo tempo insieme alla combustione con fiamma e successivamente da sola quando siano eliminate tutte le sostanze volatili. Essa avviene in generale nelle sostanze combustibili incandescenti, ma possono verificarsi casi in cui avviene a temperature piuttosto basse ed allora si verifica senza alcun fenomeno di luminosità;
- *combustione con fiamma*: in questo caso il processo è più complesso. I prodotti della

distillazione dei combustibili solidi, i vapori dei liquidi infiammabili o i gas che si combinano con l'ossigeno formando atomi di idrogeno liberi e particolarmente attivi, con un processo di reazione a catena.

Nell'evoluzione dell'incendio si possono individuare quattro fasi caratteristiche:

**fase d'inizio**, la cui durata dipende dai seguenti fattori:

- infiammabilità del combustibile;
- possibilità di propagazione della fiamma;
- velocità di decomposizione del combustibile coinvolto dall'incendio;
- geometria e volume degli ambienti interessati dall'incendio;
- possibilità di dissipazione del calore nel combustibile;
- ventilazione dell'ambiente;
- caratteristiche superficiali del combustibile;
- distribuzione del combustibile nell'ambiente.



*Fig 1.1 – Fase iniziale dell'incendio.*

**Fase di estensione**, si ha:

- riduzione di visibilità a causa dei prodotti della combustione;
- produzione di gas tossici e corrosivi;
- formazione e propagazione di sacche nelle quali gas infiammabili si concentrano e possono raggiungere i loro limiti di infiammabilità e di esplosione;
- aumento della velocità di combustione;
- aumento rapido delle temperature;
- aumento dell'energia di irraggiamento.

In questa fase, materiali vicini al focolaio di incendio, anche se non toccati dal fuoco, raggiungono il loro punto di accensione e contribuiscono a dare maggior corpo al fenomeno producendo gas infiammabili.

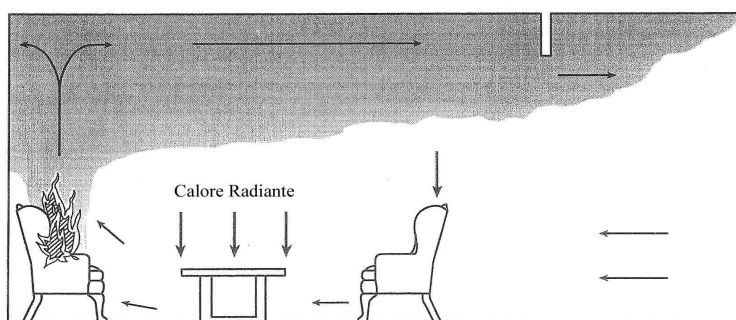


Fig 1.2 – Fase di estensione dell'incendio.

**Fase d'incendio generalizzato (flash-over)**, le cui caratteristiche essenziali sono:

- brusco innalzamento della temperatura;
- aumento esponenziale della velocità di combustione;
- forte aumento dell'emissione dei gas che si espandono in senso orizzontale e ascensionale;
- formazione di zone di turbolenza visibili;
- i combustibili vicini al focolaio si accendono spontaneamente, quelli più lontani si riscaldano e raggiungono la loro temperatura di combustione, con produzione di gas infiammabili.

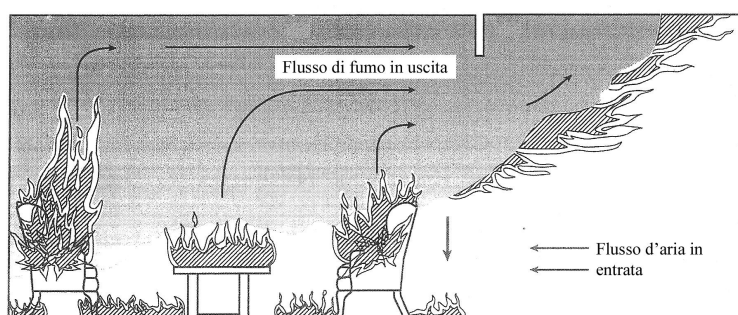


Fig 1.3 – Incendio in corrispondenza del flash over.

**Fase di estinzione**, avviene dopo che si è raggiunta l'accensione completa dei materiali combustibili, il fenomeno incomincia a rallentare e, in assenza di apporti esterni, si avvia all'estinzione.



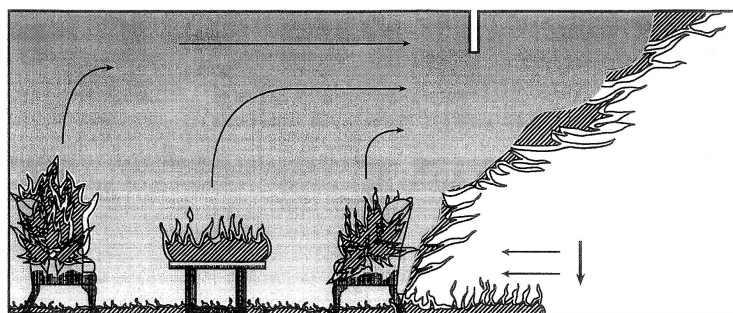


Fig 1.4 – Fase di incendio generalizzato.

Durante la fase che anticipa il flash-over il tasso di crescita dell'incendio è definito dall'HRR (Heat Release Rate) cioè dal calore generato dagli oggetti che costituiscono il combustibile della fiamma.

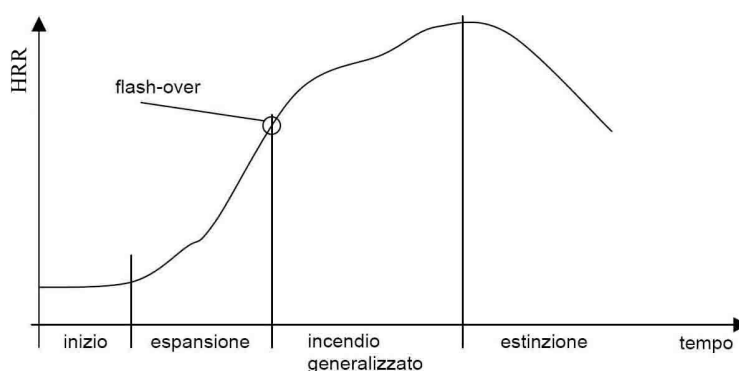


Fig 1.5 – Andamento dell'HRR in un incendio in locale chiuso.

L'HRR descrive come l'energia disponibile viene rilasciata. Questa quantità è indicativa della potenza (l'energia rilasciata nell'unità di tempo) ed è una misura quantitativa delle dimensioni dell'incendio.

La curva tipica dell'HRR, in caso di incendio in luogo chiuso, è caratterizzata da una fase iniziale di crescita, un periodo di regime quasi stazionario e da una fase di spegnimento. Il valore dell'HRR solitamente misurato è quello di picco e viene definito tramite prove sperimentali. In un incendio al chiuso gli HRR dei singoli oggetti infiammati vengono sommati ad ottenere un HRR rappresentativo dell'intero locale. Le temperature che possono essere raggiunte in un incendio dipendono dai materiali presenti, quella delle fiamme può variare fra i 1700°C ed i 2500°C, mentre quella del soffitto raggiunge i 1000°C.

In pratica, le temperature medie sono inferiori a causa delle aperture che, permettono lo sfogo dei fumi e del calore e l'afflusso di aria fresca: normalmente non si superano, salvo in limitate aree, i 900°C.

## **1.2 – Metodi di investigazione attuali**

Generalmente in sede legale gli aspetti ritenuti più interessati sono:

- le cause di innesco;
- il punto di origine e il percorso seguito dalla fiamma;
- le temperature raggiunte.

Nella quasi totalità dei casi il lavoro dei periti si concentra su questi tre aspetti ed è quindi interessante comprendere quale sia l'attuale stato dell'arte delle tecniche utilizzate. Di seguito andremo ad analizzare le principali metodologie investigative relative ai tre campi di interesse precedentemente esposti.

### **1.2.1 – Cause di innesco**

Le indagini devono permettere di individuare i dispositivi da cui è dipeso l'innesco e se quest'ultimo è dovuto ad un guasto o ad un intervento umano diretto (incendi dolosi) o indiretto (negligenza).

Per iniziare è necessario precisare che l'accertamento delle cause di un incendio si deve sempre basare sulla presenza di prove, piuttosto che sulla loro assenza; comunque quando la zona di origine dell'incendio è definita chiaramente è possibile risalire alle cause anche in mancanza di prove fisiche. In questo caso si ricorre all'eliminazione graduale di tutte le potenziali forme di innesco che non chiariscono o chiariscono solo parzialmente lo sviluppo delle fiamme.

Tale procedimento prende il nome di *processo ad eliminazione* e coinvolge la formulazione, la verifica e l'eventuale rigetto di più ipotesi alternative. Ogni volta che un investigatore scarta un'ipotesi deve però essere in grado di giustificarne i motivi in modo oggettivo. Generalmente le ipotesi vengono basate su riscontri di tipo visivo sullo stato degli oggetti e dei luoghi coinvolti dall'incendio, ed è questa la ragione per cui l'applicabilità di tale procedura diminuisce all'aumentare del grado di distruzione del locale. Vi sono poi situazioni in cui non esistono differenze visive tra due alternative: è il caso di dispositivi che producono calore troppo vicini ad un combustibile, per i quali non si riesce a distinguere fra quelli che hanno innescato l'incendio e vengono poi coinvolti e quelli semplicemente coinvolti nelle fiamme provocate da un'altra fonte di calore.

Da tali considerazioni si deduce come sia difficile trarre conclusioni affidabili dal solo processo ad eliminazione che però può fornire importanti indicazioni se lo si abbina alla

conoscenza del primo oggetto incendiato ed alla sequenza di accensione seguita dalla fiamma. Il processo ad eliminazione può essere utilizzato efficacemente anche per escludere le cause accidentali di un incendio, nel caso si abbia il sospetto che sia di tipo doloso. In tale situazione infatti, si può fare affidamento anche su indizi legati al tipo di innesco e allo sviluppo delle fiamme. Tali indizi sono:

- *presenza di incendi multipli*: sono due o più incendi separati e simultanei che hanno differenti storie evolutive senza alcun punto di contatto fra loro;
- *trailer (sentieri)*: quando del carburante viene intenzionalmente versato in modo continuo da un'area all'altra sono visibili delle tracce allungate conosciute con il nome di “trailer”, sentieri appunto;



Fig 1.6 – Esempio di trailer patterns.

- *irregular patterns (tracce a forma irregolare)*: tracce a forma irregolare o a forma di pozza (pool-shaped) possono essere il risultato dell'utilizzo di un liquido infiammabile. Tale conclusione però non può essere basata solo sull'osservazione visiva perché questo tipo di tracce dipende anche dal tipo di materiale e dall'intensità del flusso di calore. Queste tracce infatti, sono comuni anche in situazioni di incendio generalizzato o di collasso della struttura. Se si sospetta la presenza di liquido infiammabile è necessario procedere all'analisi chimica dei residui rilevati in corrispondenza della traccia;



Fig. 1.7 – Esempio di pool-shaped patterns.



Fig 1.8 – Esempio di irregular patterns.

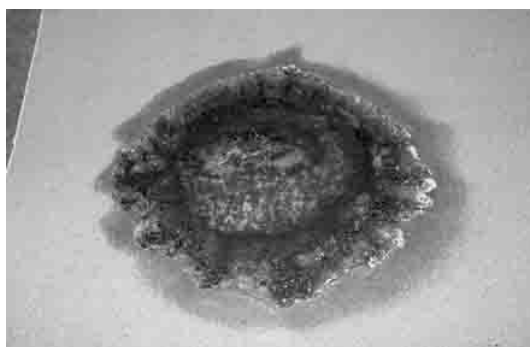


Fig 1.9 – Esempio di doughnut-shaped patterns.

- *doughnut-shaped patterns (tracce a forma di ciambella)*: una traccia a forma di ciambella (una corona circolare fortemente carbonizzata racchiude un'area poco bruciata) può essere il risultato di un liquido infiammabile. Questo tipo di traccia è dovuta al fatto che il combustibile raffredda il centro della pozza mentre le fiamme sul perimetro carbonizzano il pavimento e, quando si rileva, è necessario condurre ulteriori analisi;
- *dispositivi che possono innescare un incendio*: alcuni esempi sono rappresentati da resti di candele o di sigarette, dispositivi elettrici, bombe incendiarie; spesso tali dispositivi sono dotati di un timer meccanico o elettrico in grado di ritardare l'inizio dell'incendio in modo da permettere l'allontanamento del piromane;
- *indicatori non direttamente collegati alla combustione*: tali indicatori non sono direttamente collegabili all'incendio, ma possono fornire indicazioni utili agli investigatori. Alcuni esempi sono:
  - posizione remota dell'incendio in modo da diminuire la visibilità;
  - incendi appiccicati vicino ad apparecchiature elettriche in modo da rendere difficoltose le indagini;
  - rimozione o spostamento di oggetti prima dell'incendio;
  - assenza di oggetti personali quali foto, gioielli, trofei, opere d'arte, animali,

documenti, ecc.;

- entrate bloccate o ostruite;
- danneggiamento di protezioni attive o passive contro il fuoco.

### 1.2.2 – Punto di origine e percorso seguito dalla fiamma

La conseguenza di come l'incendio si è evoluto è di fondamentale importanza per determinare il punto di origine, senza il quale è impossibile capire le cause che hanno portato all'innescio della fiamma. L'individuazione del punto di origine richiede numerose informazioni derivanti da:

- i segni lasciati dal fuoco (*fire patterns*);
- le testimonianze delle persone;
- la presenza di apparecchiature elettriche danneggiate.

Con il termine *fire patterns* si indicano gli effetti che il fuoco esercita sulle strutture coinvolte. Esistono due tipi di *fire patterns*:

- quelli che indicano lo spostamento della fiamma (*movement patterns*);
- quelli che indicano l'intensità della fiamma (*intensity patterns*).

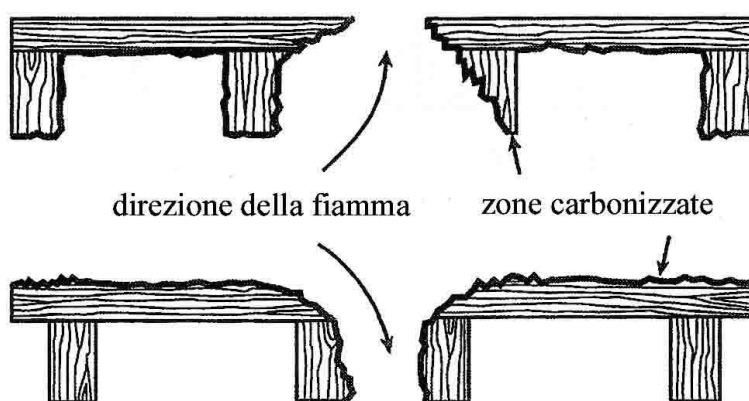


Fig 1.10 – Fori creati da fiamme provenienti dal basso (disegno superiore) e dall'alto (disegno inferiore).

I primi sono dovuti alla direzione di accrescimento della fiamma mentre i secondi derivano dalla reazione del materiale al flusso di calore. Alcuni esempi di *movement patterns* sono:

- la penetrazione della fiamma nelle superfici orizzontali può essere causata dal calore radiante, dall'azione diretta della fiamma o dalle braci. La penetrazione dall'alto verso il basso è spesso considerata inusuale perché naturalmente il calore si sposta dal basso verso l'alto. In

caso di incendio completamente sviluppato però i gas caldi possono essere forzati ad entrare all'interno di piccoli fori nel pavimento causando la penetrazione. La formazione del foro può anche essere il risultato di un'intensa combustione di alcuni mobili quali sedie, poltrone o materassi in poliuretano oppure al collasso del soffitto. È possibile distinguere la direzione di penetrazione della fiamma dalla conicità del foro; la base maggiore, infatti, identifica sempre il punto di provenienza della fiamma, mentre quella minore il punto di arrivo; perciò osservando la figura 1.10 si nota come nel disegno superiore la fiamma proceda dal basso verso l'alto, mentre in quello inferiore avviene il percorso inverso. Un altro modo per capire la direzione di penetrazione è quello di comparare l'estensione del danno tra i due piani separati dalla superficie. Se il fuoco si è mosso dal basso verso l'alto i danni alla superficie inferiore saranno maggiori rispetto a quella superiore. Si verifica invece il contrario se il fuoco attraversa la superficie dall'alto verso il basso;



Fig 1.11 – Esempio di *pulled light bulb* generato da una sorgente di calore posizionata a sinistra.

– *distorsione dei bulbi delle lampadine (pulled light bulb)*: i bulbi delle lampadine ad incandescenza possono talvolta mostrare la direzione di provenienza del calore. La zona del bulbo affacciata alla sorgente di calore rammollisce ed i gas all'interno possono espandersi creando una bolla. Tale fenomeno prende il nome di *pulled light bulb (lampadina stirata)* e si verifica solo per lampadine con potenze maggiori di 25W, per potenze inferiori la bolla è diretta verso l'interno perché nel bulbo vi è una depressione e non una pressione;

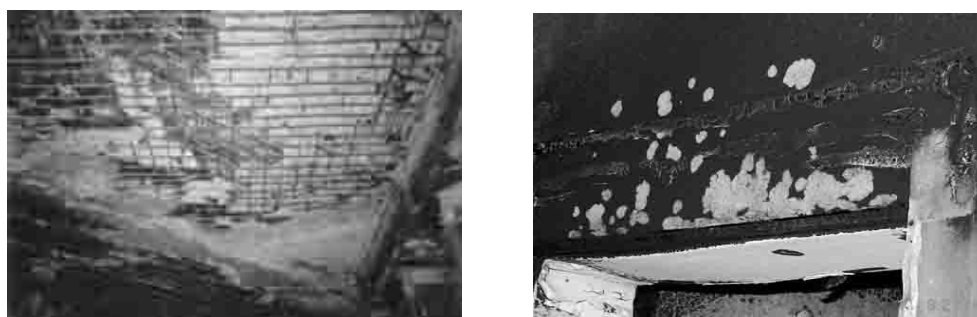


Fig. 1.12 – Esempi di *spalling*.

– *il decadimento delle caratteristiche tensili delle molle di materassi* consente di ottenere numerose informazioni sulla direzione, l'intensità e la durata dell'incendio. I risultati dei test

di laboratorio indicano che il decadimento è funzione del flusso di calore a cui è sottoposta la molla. Questi test rivelano che riscaldamenti ad alta temperatura per brevi periodi di tempo e riscaldamenti a temperatura moderata (circa 400°C) producono lo stesso effetto sulle molle in termini di perdita di resistenza alla trazione. I test rivelano inoltre che se le molle sono caricate il decadimento delle caratteristiche tensili è maggiore. Il metodo di analisi consiste nel comparare le differenze tra le molle in diverse zone del materasso. L'analisi comparativa può quindi assistere l'investigatore nello sviluppo di ipotesi relative all'ubicazione della fonte di calore. Ad esempio, se solo le molle di un lato del materasso hanno parte della loro resistenza, è possibile ipotizzare che quell'area fosse più vicina alla fonte di calore o che il flusso d'aria fosse più consistente;

– *heat shadowing (riflessione del calore)*: questo fenomeno è dovuto alla barriera esercitata da un oggetto che blocca il passaggio della fiamma o del calore radiante causando la generazione di un contorno sull'oggetto che viene protetto. La traccia così generata può aiutare l'investigatore nell'individuazione del punto di origine;

– *osservazione del soffitto*: il fatto che i gas caldi siano soggetti ad una naturale spinta verso l'alto concentra l'energia del calore sulle superfici orizzontali, perciò le tracce lasciate sul lato inferiore della superficie possono essere utilizzate come indicatori della posizione di una sorgente di calore. Ciò non significa che l'area individuata corrisponda con il punto di origine, infatti se è vero che l'area al di sopra della fiamma viene riscaldata prima delle altre, vi può essere la possibilità che il combustibile che ha generato la fiamma si esaurisca velocemente e che il fuoco si sposti in una zona dove trova altro combustibile in maggiore quantità, bruciando così per più tempo e generando in quella zona la traccia più evidente.

Questo tipo di tracce ha generalmente una forma circolare e può essere costituita da un annerimento della superficie o, nel caso di fonti calore particolarmente intense, da zone in cui il calcestruzzo si sfalda, in tal caso al fenomeno si dà il nome di *spalling* (frammentazione).

Alcuni esempi di *intensity patterns* sono:

– *carbonizzazione delle superfici lignee*: quando il legno viene esposto ad elevata temperatura subisce una decomposizione chimica che provoca la creazione di gas, vapore acqueo e fumi. Il residuo solido è costituito principalmente da resti carbonizzati. La misurazione della profondità della zona carbonizzata costituisce un criterio affidabile per la valutazione della direzione di accrescimento dell'incendio. Il modo corretto di utilizzare tale metodo è quello di misurare la profondità in un certo numero di punti, riportando poi i risultati su di una griglia. Una volta riportati tutti i punti è necessario connettere quelli che presentano

lo stesso valore, individuando così delle zone di iso-profondità. È facile poi capire come le aree più vicine alla fonte di calore siano quelle più profonde. Perché tale analisi fornisca dei risultati sensati è necessario tenere in considerazione le variabili che la possono condizionare, ed in particolare:

- la comparazione dei risultati ottenuti può essere fatta solo per materiali dello tipo;
- la ventilazione influenza notevolmente la velocità di combustione;
- è necessario effettuare un certo numero di misure in modo da diminuire il peso di eventuali dati errati;
- accuratezza del metodo di misura utilizzato. I dati devono essere ottenuti con lo stesso sistema di misura.

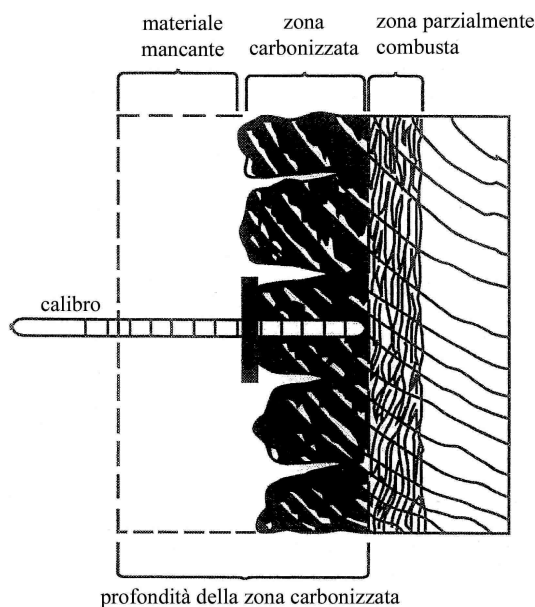


Fig. 1.13 – Misurazione della profondità della zona carbonizzata.

La misurazione della profondità della zona carbonizzata non può essere utilizzata per determinare la durata dell'incendio perché è impossibile conoscere la quantità di materiale bruciato nell'unità di tempo, la regola di 1 pollice (25,4 mm) di penetrazione ogni 5 minuti (valida per legno di pino) è ricavata in laboratorio e non tiene conto della variazione dell'intensità del fuoco durante l'incendio;

- *calcinazione*: il termine calcinazione è utilizzato per descrivere i cambiamenti che interessano le pareti in cartongesso durante un incendio. Durante la calcinazione è possibile individuare vari step dipendenti dall'intensità del flusso di calore: nella fase iniziale lo strato esterno di carta carbonizza e il gesso dal lato esposto al fuoco cambia colore. All'aumentare del calore il cambiamento di colore si estende a tutto lo spessore e la superficie di carta opposta alla fiamma carbonizza. Quando l'intero spessore della parete diventa biancastro



significa che la carta è stata bruciata totalmente e il gesso subisce una disidratazione convertendosi in un solido friabile. Anche per la calcinazione possono essere ottenute le zone ad iso-profondità in modo del tutto analogo a quanto visto per la carbonizzazione del legno. La penetrazione della calcinazione è condizionata da differenti variabili, ad esempio:

- la comparazione dei risultati ottenuti può essere fatta solo per materiali dello stesso tipo. Ciò significa che pareti in cartongesso costruite con diversi materiali o di spessore molto differente forniscono risultati non confrontabili;
- deve essere tenuto presente il tipo di finitura, colore, stucco, ecc., infatti alcune di queste sono infiammabili e possono influenzare la profondità della zona calcinata;
- è necessario effettuare un certo numero di misure in modo da diminuire il peso di eventuali dati errati;
- la parete in cartongesso può essere danneggiata durante la fase di spegnimento o durante quella di incendio generalizzato, ciò può influire sulla coerenza dei dati raccolti o addirittura impedirne il rilevamento;
- accuratezza del metodo utilizzato. I dati devono essere ottenuti con lo stesso sistema di misura.



*Fig. 1.14 – Esempio di clean burn.*

- *il clean burn (combustione pulita)* è un fenomeno che interessa le superfici non combustibili su cui condensano la fuliggine ed i fumi quando la fiamma (o una forte fonte di calore) brucia i prodotti della condensazione creando una zona pulita. Le linee di demarcazione fra tale zona e quella coperta dalla fuliggine possono essere utilizzate per determinare la direzione di accrescimento del fuoco o la sua intensità;
- *osservazione del pavimento*: l'osservazione del pavimento può fornire indizi utili per capire se l'incendio ha oltrepassato il punto di flash-over. Il flusso di calore che, per i comuni

materiali da costruzione, comporta il superamento delle condizioni di flash-over è di 20 kW/m<sup>2</sup>, una volta raggiunte le condizioni di incendio generalizzato il flusso di calore può superare i 70 kW/m<sup>2</sup> e questo provoca la modifica o la cancellazione delle tracce preesistenti; è per tale motivo che assume una fondamentale importanza capire se il punto di flash-over è stato raggiunto.

Un metodo può essere quello di andare alla ricerca di tappeti o coperte; negli U.S.A. tali prodotti devono possedere una certa resistenza al fuoco che li rende ignifughi nei confronti delle sigarette, degli accendini o dei fiammiferi. Il fuoco non ha perciò la possibilità di svilupparsi attraverso un tappeto o una coperta senza una fonte di calore esterna come quella prodotta dalla fiamma di un incendio. In questi casi poi la fiamma termina nella zona del tappeto in cui l'energia radiante scende al di sotto del minimo necessario per innescare la combustione. Il tappeto perciò può bruciare completamente solo se le condizioni di flash-over vengono superate.

– *Fire plumes patterns*: gran parte delle tracce che si possono rilevare in un incendio sono causate dall'azione contemporanea dei gas caldi, delle fiamme e del fumo che sovrasta un incendio e che prende il nome di *fire plumes* (*piume di fuoco*). Generalmente queste tracce hanno la forma di un tronco di cono e rappresentano le linee di confine che si generano quando il fire plumes incontra una superficie piana. Tali tracce si dividono in:

- tracce a cono rovesciato;
- tracce a clessidra;
- tracce a V;
- tracce a U;
- tracce a freccia;
- tracce circolari.

La presenza di barriere come il soffitto provoca l'espansione laterale del fire plumes, quando invece al di sopra della fiamma non vi è nulla ed il fuoco è lontano dalle mura i gas caldi ed il fumo continuano a salire finché non si raffreddano alla temperatura ambiente. A questo punto il fumo ed i gas si stratificano e si diffondono nell'aria. Tali condizioni si possono verificare anche nel caso di incendi in luoghi chiusi durante le fasi iniziali dell'incendio oppure per spazi grandi con soffitti alti come nel caso di un atrio.

La forma del fire plumes è fortemente condizionata dall'HRR; combustibili con un basso HRR non sono in grado di produrre fiamme sufficientemente alte da raggiungere il soffitto, tali

fuochi producono tracce a cono rovesciato e tracce a clessidra. Quando l'HRR aumenta e la fiamma si avvicina ad una barriera orizzontale il fire plumes inizia ad assumere una forma cilindrica, se l'HRR continua a crescere ed il calore accumulato in corrispondenza della barriera è tale da creare un'azione radiante verso il basso, la parte superiore del fire plumes si allarga notevolmente generando le tracce a V, ad U o a freccia.

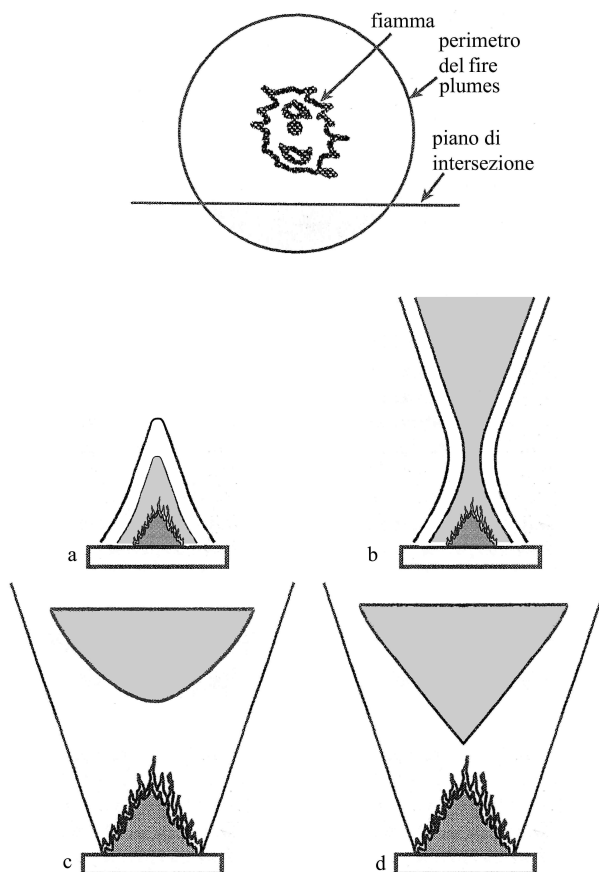


Fig. 1.15 – Traccia a cono ribaltato (a), a clessidra (b), a U (c) e a V (d).

Le tracce circolari si generano in corrispondenza della superficie inferiore della barriera orizzontale. La larghezza del fire plumes dipende dalla dimensione della base della fiamma e cresce al crescere di quest'ultima (fig. ....). Una fiamma, che cresce e si sviluppa, produce per prime tracce compatibili con fuochi di piccole dimensioni come quelle a cono rovesciato (sempre che vi sia una parete verticale sufficientemente vicina) e solo successivamente quelle a colonna, a V o ad U che vanno ad oscurare le prime.

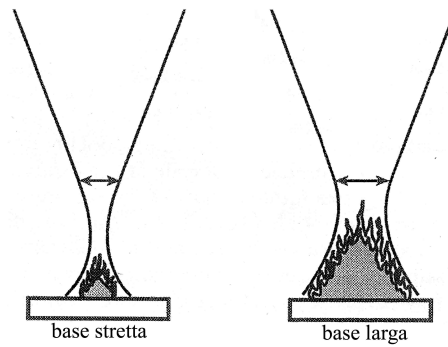


Fig. 1.16 – Effetto della base della fiamma sulla larghezza del fire plumes.

Le tracce iniziali perciò sono osservabili solo se la fiamma si estingue a causa di un intervento esterno, dalla mancanza di ossigeno o di combustibile, per tale ragione la loro osservazione permette di capire lo sviluppo dell'incendio e l'HRR massimo raggiunto.

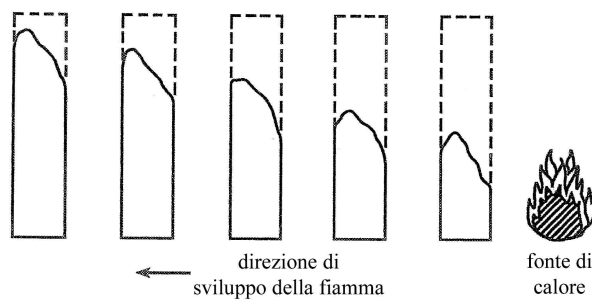


Fig. 1.17 – Tracce a freccia.

Un'attenzione particolare va riservata nei confronti delle tracce a freccia che interessano gli elementi di materiale combustibile posti in serie quali tappezzerie o liste di compensato abitualmente utilizzate per la copertura delle pareti. La direzione di sviluppo della fiamma può essere compresa tramite l'osservazione dell'altezza della parte di materiale rimanente che aumenta all'aumentare della distanza dalla fonte di calore.

Come detto all'inizio del paragrafo, oltre ai fire patterns per individuare il punto di origine è molto importante verificare la presenza di danneggiamenti alle apparecchiature elettriche (circuiti, cavi, elettrodomestici, ecc.) che possono far pensare alla generazione di archi elettrici. L'investigatore deve andare alla ricerca delle attrezzature o delle parti di cavo che non sono state danneggiate dal fuoco e capire se hanno generato un arco.

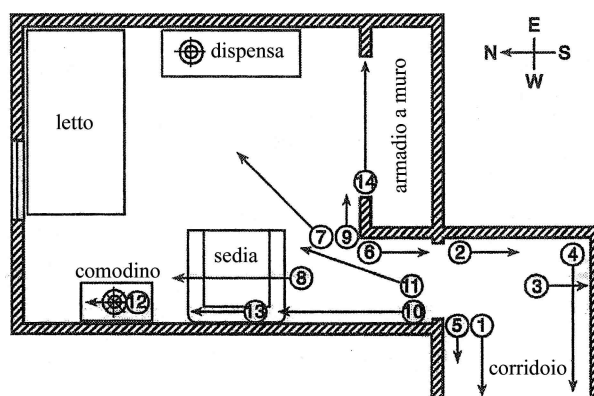


Fig. 1.18 – Esempio di diagramma a vettori della fiamma.

Tale indagine può risultare molto difficile o addirittura impossibile se il cavo è stato portato a fusione. Generalmente è più semplice individuare gli archi nei cavi in rame rispetto a quelli in alluminio che hanno un punto di fusione inferiore.

### 1.2.3 – Temperature raggiunte

Il metodo che più di frequente viene utilizzato per le temperature raggiunte, è quello di verificare la presenza di oggetti parzialmente fusi, oggetti che tipicamente sono realizzati in materiale plastico o in metallo; i primi hanno temperature di fusione comprese tra i 90°C e i 450°C e quindi possono fornire informazioni solo se si trovano in zone prive di fiamme o non troppo calde, i secondi presentano temperature di fusione più elevate e difficilmente vengono distrutti durante un incendio. I materiali metallici perciò sono più adatti per questo tipo di analisi.

Nel paragrafo 1.1 si è visto come raramente in un incendio si superano i 900°C, perciò, osservando le temperature di fusione dei metalli che normalmente si trovano sulla scena di un incendio, la raccolta dei reperti metallici può sembrare più utile.

	$T_f [^{\circ}C]$
<b>Alluminio</b>	660
<b>Leghe di Alluminio</b>	560 ÷ 650
<b>Rame</b>	1085
<b>Ottone (giallo)</b>	932
<b>Ottone (rosso)</b>	996
<b>Bronzo</b>	982
<b>Ferro</b>	1534

Tabella 1.2 – Temperature di fusione dei metalli che più comunemente vengono ritrovati sul luogo di un incendio.

Ciò è vero se ci si limita alla sola analisi visiva basata sulla temperatura di fusione o sul colore

assunto dalle superfici (che spesso è pesantemente condizionato dal rivestimento superficiale e dai gas sviluppati durante l'incendio), ma se si analizza la microstruttura si scopre come questa sia caratterizzata da trasformazioni direttamente correlabili alla temperatura, che può essere facilmente osservata attraverso microscopi ottici o elettronici. Rimane tuttavia il problema di avere a disposizione un archivio con cui confrontare i risultati, che difficilmente è disponibile in letteratura dove di norma si trovano relazioni basate su metodi di indagine di tipo visivo.

Lo scopo di questo lavoro è proprio quello di ridurre al minimo la soggettività che deriva da un'analisi di tipo visivo e di creare una raccolta di informazioni utili all'investigatore qualora si trovasse a confrontare dei resti di un incendio.

### ***1.3 – Bibliografia***

- Guide for fire and explosion investigations  
[2004] – NFPA 921
- Nozioni di antincendio  
[2002] – ENEL
- Steel and its heat treatment  
[1975] – BOFORS HANDBOOK
- Applicazioni della metallurgia alla fire investigation  
[2008] – Tesi di Laurea di Casaroli Andrea

# Il camino e la canna fumaria

## 2.1 – Introduzione

*“L'uomo si è differenziato realmente dall'animale solo a partire dal giorno in cui è diventato padrone del fuoco”*. Con questa affermazione la scrittrice Catherine Perlès ha colto in pieno un aspetto fondamentale della nostra vita. L'uso del fuoco, il suo impiego e il controllo diversificato ha contribuito in modo determinante al progresso dell'umanità. Dal giorno in cui l'uomo è divenuto padrone del fuoco ha cercato di addomesticarlo, rendendo sicuro il suo confinamento per molteplici usi: per prima cosa per scaldarsi e illuminare le abitazioni, oltre che per cucinare e allontanare gli animali. Solo in un secondo tempo l'uso del fuoco è servito per migliorare lo stile di vita e permettere lo svolgimento della stessa con sempre più comfort.

Dalla fine del Medioevo si comincia a parlare di “camino”, un strumento utilizzato per il confinamento del fuoco domestico al fine di realizzare tutte le attività legate al fuoco. Il camino costituirà per lungo tempo, a causa del suo uso improprio ed i difetti di costruzione, il maggior rischio di incendio nelle abitazioni. I continui sviluppi e miglioramenti tecnologici, uniti alla prevenzione e alla conoscenza dei rischi connessi all'uso del camino, hanno permesso di raggiungere la perfezione delle tecniche di costruzione dello stesso attorno al XX secolo. Tuttavia le migliori conoscenze dei materiali e la nascita di nuove discipline per il riscaldamento domestico hanno portato ad un progressivo abbandono del camino e ad un rapido declino di questo componente, relegandolo ad una funzione ornamentale di arredo domestico.

Un duro colpo al camino è stato inflitto dall'architettura del movimento razionalista per i quali ogni ornamento è un delitto. Negli ultimi anni il camino ha ricoperto una funzione di elemento puramente decorativo o come un capriccio di arredatori e designer. Questo repentino declino e abbandono del camino ha contribuito a disperdere l'enorme patrimonio di esperienze e conoscenze faticosamente acquisite nel corso dei secoli precedenti da esperti artigiani edili e



costruttori di camini. Per molte persone ancora oggi il camino risulta essere un oggetto la cui costruzione risulta essere spesso empirica o basata su regole tramandate da famiglie di artigiani; in realtà dietro la costruzione di un camino, e soprattutto dietro il suo corretto funzionamento, ci sono leggi fisiche e trattati teorici che fanno sì che il camino sia in tutto e per tutto da progettare, realizzare e collaudare come un qualsiasi componente o impianto. Purtroppo nella pratica comune vengono completamente ignorate le regole costruttive e le norme per un suo corretto funzionamento. Questo fa sì che in Italia, attualmente, non esistano delle norme che regolino la costruzione e l'esercizio dei camini domestici.

A differenza delle numerose norme e prescrizioni che sono presenti nei Codici italiani per la realizzazione di impianti di produzione del calore, per quanto riguarda i camini domestici, il tutto è rimandato al buon senso del costruttore e all'abilità degli artigiani del settore. A causa di quanto detto in precedenza, il camino, insieme a tutto quello che può derivare dal cattivo uso e dalla mancata prevenzione, risulta essere una delle maggiori cause di incendio domestico.



*Fig. 2.1 – Esempio di caminetto dopo un incendio.*

Certamente gli impianti a caldaia riscaldano di più e più economicamente dei camini, le lampade ad incandescenza elettriche illuminano meglio dei camini così come altri sistemi tecnologici ci permettono di rendere la nostra vita più agevole e ricca di comodità, ma talvolta l'uso del caminetto può creare un'atmosfera diversa che non è possibile riprodurre con altri dispositivi elettrici. Nelle baite di montagna o nelle zone dove il freddo è particolarmente pungente, il camino può ancora ricavarci uno spazio importante e ritrova la sua primitiva sacralità di focolare domestico.

La conoscenza delle regole costruttive del camino permettono di poter svolgere un'adeguata manutenzione e, in caso di incendio, di facilitare i soccorsi e l'individuazione delle cause che

hanno generato il malfunzionamento.

## ***2.2 – Evoluzione del camino***

La storia del camino inizia al tempo dell'addomesticamento del fuoco da parte dell'uomo, proseguendo con la ricerca del suo confinamento, mantenimento e per scaldare, illuminare e cucinare. Ripercorrere la storia del camino dalle preistoria fino ai giorni nostri sarebbe un onere lungo e non consono agli scopi di questo lavoro di tesi e, proprio per questo motivo, mi limiterò ad analizzare il camino partendo dalle prime testimonianze di focolare domestico risalenti al Medioevo, per poi arrivare agli ultimi camini moderni che rappresentano lo stato dell'arte.

Dalla preistoria fino al decimo secolo lo sviluppo dei camini domestici è stato lento e avaro di migliorie significative; in questo periodo il fuoco veniva generalmente posto al centro della stanza per permettere un miglior irraggiamento della stessa e il camino consisteva in un foro posto sul tetto sopra al fuoco, utilizzato come unico sfogo per i fumi. Il vantaggio di questa soluzione era di avere una diffusione del calore uniforme in tutta la stanza e di tenere il fuoco lontano dalle pareti, molto spesso realizzate in legno o in materiale povero comunque infiammabile.

Dal Tredicesimo secolo l'aumento della popolazione, con conseguente ingrandimento delle città, e uno sviluppo socio – tecnologico, portarono ad uno sconvolgimento dell'edilizia urbana: la pietra e i mattoni andarono sempre più a sostituire il legno dei muri e la paglia dei tetti. La sostituzione delle case di legno con case realizzate in pietra e mattoni fece diminuire il numero di incendi e consentì lo spostamento del focolare dal centro della stanza ad una delle pareti. La parete in pietra consentiva la realizzazione di una canna fumaria, evitava o diminuiva il pericolo d'incendio, permetteva di inserire il camino in qualunque ambiente, utilizzandolo non solo per cucinare, ma anche, e soprattutto, per riscaldare e illuminare le stanze. Nasceva così il camino moderno come lo intendiamo noi oggi.

Il caminetto a parete nasce nei paesi nordici dove il freddo è più acuto e pungente e comincia a prendere piede in tutta Europa tra il 1200 e il 1300. I primi camini furono del tipo “*a padiglione*”, cioè completamente aggettanti dalla parete a cui erano addossati, che ne costituiva il fondo. L'enorme cappa era sostenuta quasi sempre da colonne in pietra e l'ingombro totale del camino era notevole. La mancanza di fianchi protetti ne rendeva difficoltoso il tiraggio. La grandezza eccessiva del camino, unita alla difficoltà di riuscire a

scaldare tutte le stanze, fece propendere per una scelta costruttiva meno prominente: la soluzione fu di costruire il camino integralmente nel muro, il quale doveva per forza essere di grande spessore; questo causò una difficoltà nella realizzazione di camini nei piani superiori delle abitazioni. La soluzione, come spesso accade, è un compromesso: il camino venne inserito per metà nella parete, per aiutare il tiraggio e rendere meno ingombrante la struttura, consentendone l'impiego anche con muri di spessore minore.

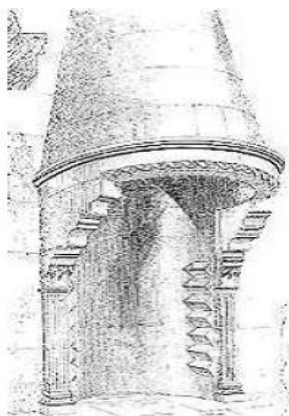


Fig. 2.2 – Camino medievale in muratura.

Un altro problema progettuale e costruttivo del camino consisteva nei fumi: un camino esterno al muro scaldava di più, ma faceva troppo fumo, mentre un camino totalmente incassato scaldava poco spillando meno fumo. Le soluzioni proposte e le migliorie apportate nel corso degli anni furono di natura empirica e votate alla soluzione migliore che garantiva un ambiente caldo e allo stesso tempo con la minore presenza di fumi all'interno della casa. Per oltre tre secoli, tuttavia, la storia del camino è solo soprattutto architettonica e stilistica perché non vi furono progressi tecnici significativi.

Tutte le migliorie tecniche apportate fino al diciassettesimo secolo sono più che altro consigli pratici e soluzioni specifiche dettate soprattutto dal buon senso e dall'esperienza; risolti i problemi architettonici ed edilizi si affrontarono quelli legati alla meccanica di funzionamento del camino.

Tra il 1600 e il 1700 si cominciano ad apportare miglioramenti tecnici riguardanti la riduzione dei fumi negli ambienti e per risolvere il cattivo tiraggio del camino. Vengono inserite prese esterne per tirare l'aria in modo che gli ambienti domestici non fossero soggetti al ricambio di aria fresca dall'esterno: in questo modo la rigenerazione dell'aria interna avveniva ad una temperatura più confortevole.

Intorno al 1745 compaiono i primi caminetti realizzati completamente in lamiera di ferro, appoggiabili al muro, che sfruttano la conduttività del metallo per aumentare l'irraggiamento. Questi prototipi sono ancora conosciuti con il nome di “*caminetti alla prussiana*”.

Negli anni successivi i miglioramenti del camino percorrono due strade differenti: da un lato gli scienziati provano a capire le cause dei fumi e del cattivo tiraggio studiandone la fluidodinamica, mentre dall'altro scultori e artigiani edili sperimentano nuovi materiali da costruzione; vengono inventati i primi camini in argilla refrattaria, resistente a temperature maggiori.

Queste sono solo delle piccole anticipazioni rispetto alla vera rivoluzione tecnica e scientifica che avverrà alla fine del XVIII secolo e proseguirà nel corso di tutto l'800. Le maggiori scoperte sono da attribuire a due personaggi straordinari, Benjamin Franklin e Benjamin Thompson, conte di Rumford, entrambi coloni americani, che unendo al nuovo spirito scientifico ed alle nuove scoperte tecniche il senso pratico e lo spirito di intraprendenza, risolsero, in maniera quasi definitiva, il problema dei camini.

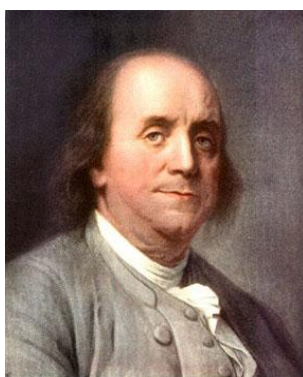


Fig. 2.3 – Benjamin Franklin.

Benjamin Franklin ( Boston, 17 gennaio 1706 – Philadelphia, 17 aprile 1790 ) dopo aver fondato la Società Filosofica Americana, la prima compagnia di Vigili del Fuoco e la prima società di assicurazione contro gli incendi, ideò il “*caminetto Franklin*”. Franklin per primo colse, in un'epoca in cui nessuno sapeva molto sul calore, e poco di più sul fumo, che il fumo era in realtà più pesante dell'aria, e che non avrebbe mai potuto risalire una canna fumaria senza l'apporto del calore, nozione del tutto ignorata prima di lui. Consapevole che una colonna d'aria e fumo calda che risale una canna fumaria crea un debito d'aria nell'ambiente in cui si trova il caminetto, Franklin dedusse logicamente che un apporto d'aria fresca doveva essere in qualche modo assicurato all'ambiente e propose una presa d'aria posta direttamente nel focolare e collegata all'esterno. Un'ulteriore proposta fu quella di proporzionare l'apertura dei caminetti nella stanza: sostenne che l'apertura della bocca del camino doveva mantenere delle proporzioni tra altezza e larghezza in modo da non disperdere il calore.

Mentre studiava come migliorare l'efficienza dei camini, Franklin era anche alle prese con uno studio su come sbarazzarsene definitivamente, sostituendoli con strumenti più efficaci. Pubblicò un articolo in cui descriveva il funzionamento di una nuova stufa per bruciare

carbon fossile. La nuova stufa-caminetto prese il nome di “*caminetto di Pennsylvania*”: realizzata in metallo, molto economica grazie allo sviluppo delle tecniche metallurgiche ed alle prime produzioni di serie, ebbe uno straordinario successo e si diffuse soprattutto nel nord America.



*Fig. 2.4 – Caminetto di Pennsylvania.*

Negli anni successivi Benjamin Thompson ( Woburn, 26 Marzo 1753 – Autiel, 21 Agosto 1814 )raccolse l'eredità di Franklin e fondò, con i suoi denari, la Royal Institution of Graet Britain per lo sviluppo di nuove applicazioni scientifiche destinate ad alleviare la povertà. Scopri le correnti di convezione e ideò un prototipo di calorimetro per calcolare il calore di combustione di legna, carbone ed altri combustibili utilizzati all'epoca per riscaldare le case.

Diede un fondamentale contributo alla scienza con i suoi studi sul calore, scoprendo per primo che il calore non era, come si era sino ad allora pensato, una sostanza, ma che era semplicemente prodotto dal moto delle particelle.

Thompson acquistò la sua enorme competenza sui camini grazie al suo lavoro “sul campo”; durante il suo soggiorno in Inghilterra, insieme ai suoi mastri muratori, intervenne nella sistemazione e messa a punto di oltre 500 caminetti, rendendoli più efficienti e conquistando una vastissima fama in questo campo. L'idea di base era molto semplice, Thompson sosteneva che il fumo avesse una naturale tendenza a risalire le canne fumarie e che, quindi, l'unico ausilio consiste nell'individuare e rimuovere tutti gli ostacoli presenti nel cammino dei fumi. Uno degli ostacoli principali era l'enorme dimensione delle cappe e delle canne fumarie allora in uso, che provocavano il raffreddamento dei fumi, rallentandone la spinta verticale al punto che un semplice refole di vento poteva facilmente infilarsi nella canna e respingere i fumi nell'ambiente domestico. Questa enorme dimensione delle canne fumarie era dettata dalla necessità di avere spazio sufficiente per permettere agli spazzacamini di infilarsi nei condotti per ripulirli. Thompson, grazie ai suoi studi, riuscì a migliorare l'efficienza della combustione e a preservare la canna fumaria dall'accumulo eccessivo di residuo, evitando la necessità di pulizie così impegnative e consentendo il restringimento della canna stessa.

Stabili inoltre che le superfici interne del camino dovessero essere quanto più possibile lisce e prive di angoli accentuati, per facilitare lo scorrimento dei fumi, il cui percorso doveva essere il più verticale possibile, e raccomandò quindi di porre l'imbocco della canna fumaria direttamente sopra il piano di fuoco.

Infine i suoi studi sulla diffusione e propagazione del calore lo portò a realizzare le pareti interne del camino inclinate con angoli studiati matematicamente al fine di riflettere più calore possibile verso l'interno del locale. Il risultato fu un camino diverso da quello che si conosceva fino a quel momento, notevolmente più efficace nel riscaldamento e praticamente privo di fumi.

Thompson, oltre a descrivere minuziosamente forma, dimensioni e relazioni rigorose tra le parti del camino, fornì anche preziosi consigli sulla qualità del combustibile da utilizzare, sui metodi di accensione, sulla manutenzione, etc. che sono tutt'oggi ancora validi.

Il “*caminetto Rumford*”, che prese il nome dal casato di Thompson, si diffuse principalmente nel mondo anglosassone e diventò un punto di riferimento per la costruzione dei caminetti per tutto l'Ottocento. Nel corso dell'Ottocento si raggiunse la consapevolezza che l'irraggiamento era la fonte di calore del camino e si spinse alla ricerca e all'uso di combustibili maggiormente radianti, come carbon fossile o carbon coke. Per tutto il diciannovesimo secolo vennero scritti articoli e trattati sul riscaldamento domestico e sui camini, ma quasi tutti fecero riferimento ad una struttura simile al caminetto Rumford.



Fig. 2.5 – Caminetto moderno.

Il problema principale rimane legato alla possibilità di avere un ritorno di fumi nell'ambiente dovuto alle seguenti cause: 1) difficoltà di introdurre nella stanza la stessa quantità di aria che viene aspirata dal camino; 2) dimensioni sbagliate o eccessive della gola; 3) temperatura troppo bassa dei condotti di combustione; 4) ridotta velocità d'efflusso dei fumi; 5) azione diretta o indiretta del vento sulla sommità della cappa. Per ciascuno di questi problemi si sono

trovate soluzioni che vanno dalla riprogettazione dei condotti interni, all'utilizzo di cappellotti sui comignoli esterni e all'uso di un camino a ventilazione, che preriscalda l'aria e la mescola in continuazione con l'aria dell'ambiente per evitare un deficit d'aria.

I progressi tecnici del ventesimo secolo, tuttavia, portarono ad un progressivo abbandono dell'uso del camino; per riscaldare gli ambienti vennero scelte delle soluzioni più efficienti ed economiche come le stufe o, più recentemente, le caldaie. Per l'illuminazione invece, le lampadine a incandescenza soppiantarono definitivamente il camino già nell'Ottocento. Infine, si scelse di utilizzare delle cucine prima a legna e carbone, e poi successivamente a gas, come metodo di cottura, relegando il caminetto ad una funzione secondaria.

## **2.3 – Funzionamento del camino**

### **2.3.1 – Generalità**

Gli elementi fondamentali di un qualsiasi impianto di riscaldamento, compreso il caminetto, non è il bruciatore, bensì la canna fumaria.

Gli elementi stufa o caminetto non sono elementi automi dell'impianto e senza una buona canna fumaria, non si discostano di molto da un semplice bruciatore, che ha la sola funzione di confinamento del fuoco.

L'uscita dei fumi dalla stufa o dal camino, pertanto, non può essere semplicemente risolta con un tubo che mette in comunicazione il caminetto con l'esterno, ma va considerata sotto il profilo tecnico con lo studio fisico del fenomeno.

Le massime prestazioni dell'impianto sono strettamente legate a tre fasi di vita dell'impianto:

- fase di progettazione;
- fase di realizzazione;
- fase di manutenzione.

Capire come funziona una canna fumaria aiuterà a comprenderne l'importanza della sua funzione e a non sottovalutare il suo dimensionamento.

### **2.3.2 – Funzione della canna fumaria**

Una canna fumaria ben progettata deve assolvere a due funzioni principali:

- Evacuare i fumi della combustione ad un'altezza dal suolo sufficiente a favorirne la dispersione, così da renderli innocui per la salute e la sicurezza dell'uomo.
- Costituire il “motore” della combustione. Il camino è un motore statico, senza parti in movimento, il cui compito è di spingere l'aria comburente nella camera di combustione, rendendo così possibile la reazione di combustione stessa.

Dalle conoscenze della fisica e della chimica della combustione sappiamo che una reazione di combustione avviene quando al sistema combustibile – comburente, attraverso una sorgente d'ignizione, viene fornita la necessaria energia di attivazione (è l'energia necessaria al sistema per iniziare un determinato processo) capace di portare la temperatura del sistema alla sua temperatura di autoignizione, cioè la temperatura al di sopra della quale ha luogo l'ignizione e la reazione è capace di sostenersi e autoaccelerarsi.

Nei caminetti e nelle stufe l'alta temperatura, necessaria al sostentamento del processo di combustione, viene assicurata con il confinamento del combustibile e del comburente nella camera di fuoco.

### **2.3.3 – Teoria elementare del camino**

Il funzionamento del camino si basa sul semplice principio dei vasi comunicanti, con il fluido che tende ad assumere e conservare lo stesso livello in ogni vaso, purché:

- i due vasi comunichino tra loro;
- il fluido contenuto nei due vasi abbia la stessa densità.

L'aria, essendo un fluido dotato di massa, ha una propria densità che dipende in modo diretto dalla temperatura. In una prima analisi approssimativa, si può affermare che all'aumentare della temperatura la densità dell'aria tende a diminuire (in realtà la densità dipende anche da altri parametri come pressione, volume specifico, ecc., ma possiamo considerare che il principale parametro d'influenza sia la temperatura visti i valori elevati che si raggiungono durante la combustione).

In figura 2.6 vengono mostrati due camini, A e B, di identica altezza ed in comunicazione tra loro alla base, in corrispondenza di un tratto orizzontale, dove al centro vi è una saracinesca che li separa. Alla temperatura ambiente le due colonne d'aria contenute nei camini avranno la stessa densità e di conseguenza lo stesso peso. In conclusione i camini sono in equilibrio statico.



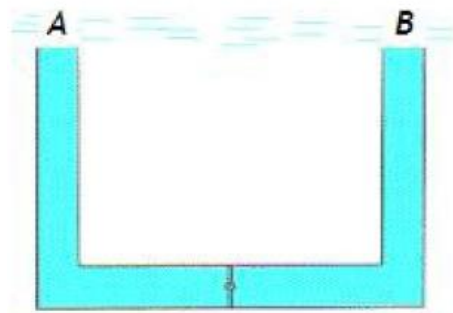


Fig. 2.6 – Camini in equilibrio statico.

Se somministriamo calore alla base della colonna A, la temperatura dell'aria contenuta in A comincerà a salire.

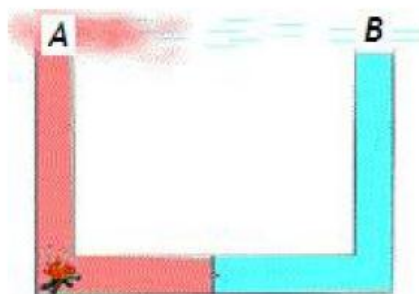


Fig. 2.7 – Aumento di energia nella colonna A.

L'aumento della temperatura, ossia la somministrazione di energia alle molecole di gas, determina l'accelerazione del moto delle molecole costituenti il gas stesso, provocando la sua espansione. Una parte dei gas sarà espulsa dalla sommità del camino, mentre la parte restante all'interno diminuirà di densità, diventando più leggera.

In queste condizioni, aprendo la saracinesca per mettere in comunicazione le due colonne, viene alterato l'equilibrio statico descritto precedentemente. L'aria contenuta nella colonna A, meno densa e più leggera, tenderà ad essere espulsa dalla sommità del camino. Viceversa l'aria contenuto nella colonna B, più fredda e quindi più densa e pesante, per gravità tenderà a prendere il posto dell'aria evacuata dalla colonna A, per ristabilire l'equilibrio del sistema.

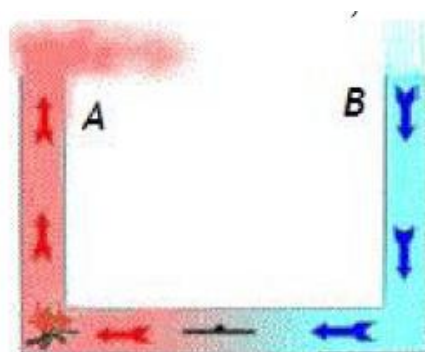


Fig. 2.8 – Principio di funzionamento del camino.

A contatto con la fonte di calore, tuttavia, l'aria fredda proveniente dalla colonna B aumenterà di temperatura. Divenuta anch'essa più calda e più leggera, verrà spinta verso l'alto dalla nuova aria che sopraggiunge dalla colonna B. L'unione delle due colonne e l'apporto continuo del calore determinano il funzionamento del sistema.

1) Applicazione dell'equazione di Bernouilli al calcolo della sezione dei camini

L'equazione di Bernouilli descrive l'energia posseduta dal fluido in moto ed è la somma di contributi di energia: potenziale, cinetica e di pressione. L'equazione di Bernouilli si ottiene applicando ad un fluido in moto in un condotto l'equazione della meccanica:  $F = m \times a$ .

Per il moto stazionario di un fluido ideale, l'applicazione della seconda legge della dinamica porta a scrivere la relazione differenziale:

$$v \times dp + d\left(\frac{u^2}{2}\right) + g \times dz = 0$$

che integrata tra due sezioni 1 e 2, diventa:

$$\int_1^2 v \times dp + \frac{u_1^2 + u_2^1}{2} + g \times (z_2 - z_1) = 0$$

la somma di questi tre termini prende il nome di carico totale in una sezione ed esprime il fatto che nel moto stazionario di un fluido ideale il carico in ogni sezione rimane costante.

Quando andiamo a considerare il fluido reale, possiamo esprimere l'allontanamento dall'idealità del fluido tenendo conto delle perdite di carico, per questo motivo la somma dei tre termini non è più la stessa in tutte le sezioni. Le perdite di carico si dividono in perdite di carico concentrate, dovute a brusche variazioni di sezioni, curve nella canna fumaria, ecc. o perdite di carico distribuite, generate dall'attrito del fluido con le pareti del condotto e quindi direttamente proporzionali alla lunghezza della canna e dalla velocità del fluido. Nell'equazione consideriamo queste perdite di carico l'aggiunta del termine R, l'espressione diventa:

$$\int_1^2 v \times dp + \frac{u_1^2 + u_2^1}{2} + g \times (z_2 - z_1) + R = 0$$

Si consideri il camino schematizzato come un condotto ripieno di un fluido a temperatura  $T_f$  costante lungo il condotto, le cui estremità, in comunicazione con l'atmosfera, abbiano un dislivello  $z_1 - z_2 = H$  chiamato altezza del camino.

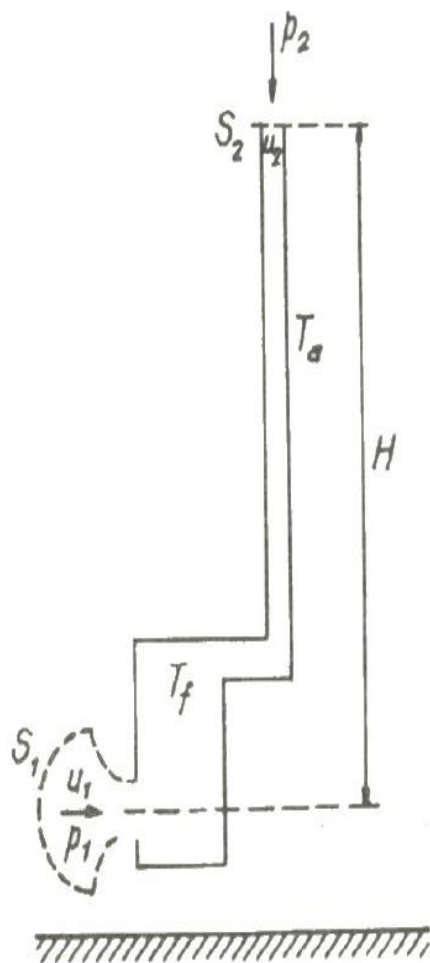


Fig. 2.9 – Schematizzazione del camino.

Sia  $T_a$  la temperatura dell'aria esterna al condotto. Consideriamo inoltre la sezione iniziale 1 della vena fluida sufficientemente lontana dalla sezione di imbocco, in modo da non avere problemi di turbolenza e ipotizzando che  $u_1^2$  sia trascurabile rispetto a  $u_2^2$ . Possiamo quindi scrivere:

$$v_f \times (p_2 - p_1) + g \times H + \frac{u_2^2}{2} + R = 0$$

dove il termine  $v_f$  indica il volume specifico del fluido interno al camino (ossia i prodotti della combustione) alla temperatura  $T_f$  e ad una pressione intermedia tra  $p_1$  e  $p_2$  che si può supporre costante dato il piccolo valore della differenza piezometrica. Si osservi che questa differenza di pressione è determinata dalle diverse quote delle sezioni 1 e 2: la pressione  $p_1$  sarà maggiore

della  $p_2$  a causa del peso della colonna di aria e dell'altezza  $H$ . Imponendo:

$$p_1 - p_2 = g \times \frac{H}{v_a}$$

e inserendo questa relazione nell'equazione precedentemente scritta, otteniamo:

$$g \times H - g \times \frac{v_f}{v_a} \times H + \frac{u_2^2}{2} + R = 0$$

Supponiamo che nel caso di moto dei fumi in un camino il valore di  $R$  sia proporzionale al quadrato della velocità,  $u_2^2$ , e dipenda da un coefficiente adimensionale  $r$  che è figlio della natura delle perdite di carico, continue o distribuite, possiamo scrivere la seguente relazione:

$$R = \frac{u_2^2}{2} \times r$$

inserendo quanto ricavato possiamo scrivere:

$$H \times \left( \frac{v_f}{v_a} - 1 \right) = \frac{u_2^2}{2 \times g} \times (1 + r)$$

sostituendo ad essa la sua espressione della velocità ricavabile dall'equazione di continuità:  $u = V / S$ , dove  $V$  rappresenta la portata volumetrica dei fumi ed  $S$  la sezione del camino, otteniamo:

$$H \times \left( \frac{v_f}{v_a} - 1 \right) = \frac{V^2}{2 \times g \times S^2} \times (1 + r)$$

Osservando infine che per l'equazione dei gas perfetti il rapporto tra i volumi specifici è uguale al rapporto di temperature possiamo sostituire  $v_f / v_a$  con  $T_f / T_a$  e ricavare la sezione del camino:

$$S = \sqrt{\frac{T_a}{T_f - T_a} \times \frac{1 + r}{2 \times g} \times \frac{V}{\sqrt{H}}}$$

il termine sotto radice non si ricava con relazioni le relazioni viste in precedenza, ma viene determinato sperimentalmente. Per questo possiamo concludere:

$$S = K \times \frac{V}{\sqrt{H}}$$

il parametro  $K$  dipende dai vari casi: dipende principalmente della configurazione del camino, dalla canna fumaria e da come è stata progettata, e dai fumi della combustione. Il termine  $V$  potrà essere calcolato una volta conosciuto il peso di combustibile bruciato nell'unità di tempo, l'eccesso d'aria con il quale avviene la combustione e la temperatura media dei fumi.

## 2) Funzionamento pratico del camino

Adattiamo il modello fisico descritto precedentemente al camino. La colonna A è il nostro camino, la stufa rappresenta la fonte di calore munita di una saracinesca, che ne è la presa d'aria, mentre la colonna B è costituita semplicemente dall'aria esterna (come mostrato in figura 2.10).

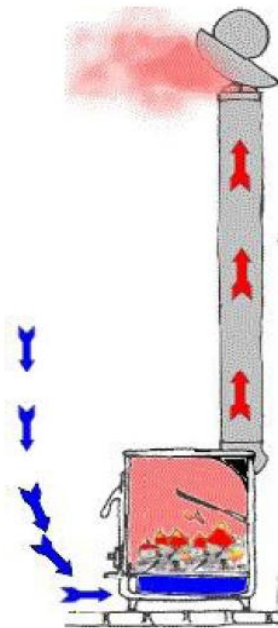


Fig. 2.10 – Schema di funzionamento del sistema camino-canna fumaria.

Considerando che il principio dei vasi comunicanti vale qualunque sia la sezione dei vasi, possiamo prendere in considerazione:

- il primo “vaso” avente per base l'intera superficie terrestre;
- il secondo “vaso” avente un'altezza pari a quella del nostro camino.

Gli strati di aria atmosferica posti oltre lo sbocco del camino possono essere ignorati, poiché esercitano un'identica pressione su entrambi i vasi. Quando accendiamo la stufa o il camino, i fumi caldi prodotti dalla combustione si espandono in virtù della loro alta temperatura, il volume di gas contenuto nel camino diminuisce di densità e l'aria esterna più pesante tende a prenderne il posto, passando attraverso la stufa. In questo modo viene anche fornito ossigeno alla combustione, che può proseguire finché non esaurisce il combustibile. In tale schematizzazione bisogna tenere presente che le differenze di pressione in gioco sono minime. Un camino ha un buon “tiraggio” quando la differenza tra la pressione atmosferica esterna e la minore pressione interna (in alcuni punti del camino si va in depressione) è compresa tra i 10 e i 20 Pa. Questa differenza è molto piccola (circa 1 – 2 decimillesimi della normale pressione atmosferica) e pertanto l'equilibrio del funzionamento del camino è influenzato da parecchi fattori e spesso risulta labile.

Un problema fondamentale del funzionamento del camino è legato alle condizioni meteorologiche perché ogni cambiamento climatico accompagna sempre un cambiamento di pressione. Nelle belle giornate l'alta pressione atmosferica provoca una maggiore spinta dell'aria più fredda alla base del camino, favorendo il funzionamento dello stesso. Viceversa nelle giornate piovose, la bassa pressione atmosferica riduce la spinta dell'aria fredda rendendo il compito del camino più arduo.

L'aria calda contenuta nel camino si muove molto lentamente, ad una velocità di pochi metri al secondo (1,5 – 2 m/s), sospinta dall'aria esterna, la cui pressione deve vincere l'inerzia della colonna fluida. La velocità dei fumi dipende anche dalle condizioni interne della canna fumaria. Pareti rugose costituiscono gravi ostacoli al movimento dei fumi perché provocano attriti, strozzature che generano turbolenze e improvvisi cambiamenti di direzione.

Un altro fattore di interesse è la temperatura dell'aria che causa la variazione di densità e quindi il funzionamento del camino. Nelle giornate fredde, aumentando la differenza di temperatura tra i fumi interni al camino e l'aria esterna, il tiraggio viene favorito; mentre nelle giornate calde il tiraggio viene ostacolato dalla ridotta differenza di temperatura.

Uno degli accorgimenti utilizzati per migliorare il tiraggio consiste nell'aumentare l'altezza della canna fumaria stando tuttavia attenti a limitare al minimo i tratti:

- con molte curve;
- orizzontali;
- inclinati.

I tratti orizzontali o inclinati vanno limitati in quanto determinano un aumento della quantità di aria contenuta nella canna fumaria e potrebbe avere un peso complessivo eccedente la capacità di spinta della corrispondente colonna d'aria esterna. Per questo motivo ad un aumento della lunghezza della canna fumaria deve necessariamente corrispondere un prolungamento del tratto verticale.

Infine, un impianto posto al livello del mare, a parità di tutti i fattori, avrà bisogno di una canna fumaria più corta rispetto ad un impianto posto in alta montagna, perché con l'altitudine la pressione atmosferica diminuisce.

Nella seguente tabella sono riportati i prodotti della combustione di un camino a legna dove vengono precisati i valori di densità e la densità relativa rispetto all'aria (è utile riportarsi alla densità relativa rispetto all'aria durante la fase di progettazione e di dimensionamento del camino).

<i>Gas</i>	<i>Formula chimica</i>	<i>Densità kg/m<sup>3</sup></i>	<i>Densità relativa</i>
Aria	-	1,293	1,000
Idrogeno	H <sub>2</sub>	0,090	0,070
Ossido di carbonio	CO	1,250	0,967
Anidride carbonica	CO <sub>2</sub>	1,977	1,529
Ossigeno	O <sub>2</sub>	1,429	1,105
Anidride solforosa	SO <sub>2</sub>	2,926	2,264
Azoto	N <sub>2</sub>	1,251	0,967

*Tabella 2.1 – Prodotti di combustione della legna con relativa densità.*

## **2.4 – Progettazione del camino**

### **2.4.1 – Calcolo del tiraggio naturale**

Il tiraggio naturale del camino rappresenta la pressione statica del camino stesso e il suo dimensionamento è un passo fondamentale della progettazione dell'impianto e del suo buon funzionamento. Il tiraggio naturale è funzione di:

- altezza della canna fumaria;
- sezione della canna fumaria;
- differenza di temperatura tra i fumi all'interno della canna fumaria e l'aria ambiente, ovvero, della differenza di densità tra i fumi della combustione all'interno del camino e l'aria esterna.

La densità dei fumi è normalmente espressa come massa per unità di volume e, all'aumentare della temperatura, diminuisce la densità in modo che l'aria esterna tenderà ad espellere i fumi più facilmente. L'espressione matematica è il calcolo della densità dei fumi è:

$$d_{fumi} = d_0 \times \frac{273}{273 + T}$$

dove  $d_0$  è la densità dei fumi a 0°C e  $T$  è la temperatura media dei fumi di combustione.

Una volta nota la densità dei fumi ad una certa temperatura è possibile calcolare la pressione statica del camino, ovvero il tiraggio naturale, la si può calcolare con la seguente formula:

$$P_h = H \times g \times (d_a - d_f)$$

dove possiamo riconoscere:

- $P_h$  è la pressione statica, ovvero il tiraggio naturale del camino;
- $H$  è l'altezza della canna fumaria espressa in metri;
- $d_a$  è la densità dell'aria (circa 1,2 kg/m<sup>3</sup> a temperatura e pressione ambiente);
- $d_f$  è la densità dei fumi alla data temperatura.

Analizzando tutti i termini dell'equazione si può notare come la densità dell'aria sia influenzata, sia dalla temperatura dell'aria stessa, quanto dall'altitudine della posizione del camino. Quest'ultima variabile è da tenere in seria considerazione quando si affronta la progettazione della canna fumaria perché un camino progettato per funzionare bene al livello del mare, difficilmente potrà avere la stesse prestazioni in alta montagna. Infine c'è da considerare anche che la densità dell'aria varia coi cambiamenti delle condizioni atmosferiche: le variazioni meteorologiche possono portare a variazioni della pressione atmosferica anche di 50 – 60 Pa. Tali condizioni devono essere valutate attentamente per non rischiare di compromettere il tiraggio naturale del camino. A questa depressione teorica vanno sottratte le inevitabili perdite di carico dell'impianto, ovvero la somma delle resistenze che il generatore di calore e la canna fumaria oppongono al libero scorrimento dei fumi.

#### **2.4.2 – Calcolo delle perdite di carico**

Un fluido che scorre all'interno di un tubo incontra una serie di resistenze che tendono a rallentare la corsa, assorbendo lungo il percorso, fino al comignolo, l'energia impressa ai



fumi dal tiraggio naturale alla base del camino.

Il calcolo delle perdite di carico di un fluido che percorre l'interno di un condotto è un problema di difficile soluzione e, spesso, ci si limita a fornire delle soluzioni numeriche o delle approssimazioni della soluzione esatta. Le perdite di carico dei fumi si possono suddividere in:

- 1) perdite per dispersione termica;
- 2) perdite per attrito;
- 3) perdite localizzate.

Di seguito verranno illustrate delle indicazioni di carattere generale utili ad individuare e risolvere i problemi del funzionamento del camino in relazione alle tre precedentemente citate categorie di perdite di carico:

1) Perdite di carico per dispersione termica.

Le canne fumarie, benché coibentate, disperdono comunque calore attraverso le loro pareti. La dispersione termica raffredda i fumi rendendoli più densi e quindi più difficoltosa risulta la loro espulsione. La trasmissione del calore nelle canne fumarie è funzione:

- della resistenza termica del materiale che costituisce le pareti del condotto; maggiore è l'isolamento termico delle pareti della canna fumaria, minore sarà la dispersione termica;

<b>Materiale</b>	<b>Conducibilità termica [W/m*K]</b>
Acciaio	15
Refrattario	1
Muratura con calcestruzzo	0,4 ÷ 0,6
Muratura di mattoni pieni	0,35 ÷ 0,52
Fibra minerale	0,04

Tabella 2.2 – Conducibilità termica dei materiali costituenti le canne fumarie.

- della geometria del camino; in particolare del diametro e della lunghezza del camino. Tanto maggiore sarà il diametro e la lunghezza del camino, tanto maggiore sarà la superficie di scambio termico;
- dalla differenza di temperatura tra la parete interna e quella esterna; tanto più fredda sarà la temperatura esterna, tanto maggiore sarà lo scambio termico tra interno ed esterno della canna fumaria. Per questo motivo le canne fumarie andrebbero, per quanto possibile, posizionate all'interno delle abitazioni dove la temperatura esterna della canna fumaria è,

presumibilmente, maggiore di quella dell'esterno del locale;

- dalla velocità dei fumi; tanto maggiore sarà la velocità dei fumi, tanto meno tempo impiegheranno gli stessi a risalire l'intera canna fumaria con la conseguente diminuzione del calore disperso.

Il calcolo delle perdite di carico per dispersione termica è piuttosto complesso, ma si può affermare che, se il camino è ben coibentato, queste costituiscono una frazione trascurabile del totale delle perdite di carico del camino. Queste perdite possono essere valutate con una buona precisione conoscendo:

- l'altezza della canna fumaria;
- la sezione della canna fumaria;
- i materiali di cui è composta la canna fumaria;
- la massa dei fumi.

## 2) Perdite di carico per attrito

Un fluido che scorre entro un tubo è rallentato dall'attrito prodotto dal contatto con le pareti del tubo. L'attrito è direttamente proporzionale alla rugosità delle pareti ed alla velocità dei fumi, oltre a dipendere dalla forma del tubo e dalla sua lunghezza, in particolare:

- maggiore è la rugosità delle pareti interne del condotto, maggiore sarà l'attrito e conseguentemente la resistenza che si contrappone al flusso dei fumi;
- maggiore sarà la velocità dei fumi, maggiore sarà l'attrito;
- più è irregolare e poco uniforme è la sezione del condotto e maggiore sarà la perdita di carico. L'irregolarità della sezione contribuisce più facilmente alla formazione del moto turbolento che fa crescere notevolmente le forze d'attrito opposte al moto e di conseguenza le perdite di carico;
- maggiore è la lunghezza del condotto e maggiore sarà la perdita di carico per attrito.

Ogni materiale ha la sua rugosità che dipende dal processo tecnologico impiegato per la realizzazione della canna fumaria. Nella seguente tabella vengono riportati i valori di rugosità di alcuni materiali utilizzati nella costruzione di canna fumarie.

<b>Materiale</b>	<b>Rugosità [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
Acciaio	0,5
Cemento	1
Refrattario	1
Muratura di mattoni	3

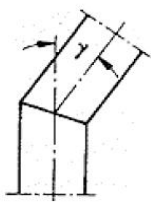
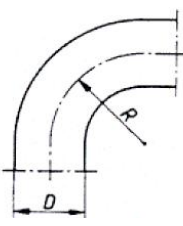
Tabella 2.3 – Valori di rugosità dei materiali costituenti le canne fumarie.

Anche in questo caso, come si può vedere dalla tabella, l'acciaio rappresenta il materiale più conveniente per la realizzazione delle canne fumarie. Chiaramente i valori riportati in tabella sono solo indicativi e, spesso, ottimistici: per i materiali non metallici dipende molto dalla posa dei mattoni, dalla malta utilizzata e dalla qualità delle materie di partenza. Analogamente esistono moltissimi tipologie di acciaio e altrettanti processi per la realizzazione della lamiera, il coefficiente di rugosità descritto si riferisce per lo più ad un ordine di grandezza che ad un numero esatto.

### 3) Perdite di carico localizzate.

Le perdite di carico localizzate (o concentrate) sono cadute di pressione dovute ad ostacoli come curve, gomiti, valvole, diramazioni, restringimenti o allargamenti della sezione. I cambiamenti di sezione facilitano la formazione del moto turbolento e la conseguente crescita delle forze d'attrito che si oppongono al moto.

Per calcolare le perdite di carico concentrate si fa riferimento a delle tabelle il coefficiente  $r$  viene ricavato da numerose prove sperimentali ed è funzione della geometria dell'ostacolo. Di seguito viene mostrata una tabella in cui sono riportati alcuni esempi di ostacoli e i relativi coefficienti riduttivi.

<b>Ostacolo</b>	<b>Dati geometrici</b>	<b>Coefficiente <math>r</math></b>
	<b>Angolo in gradi</b>	
	10	0,1
	30	0,2
	45	0,4
	60	0,7
	90	1,2
	<b>Curva a 90° - R/D</b>	
	0,5	0,8
	0,75	0,4
	1,0	0,3
	1,5	0,2
	2,0	0,2
	<b>a/D</b>	<b>Numero dei segmenti</b>

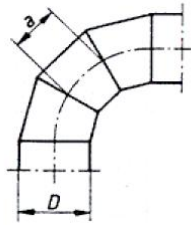
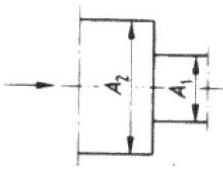
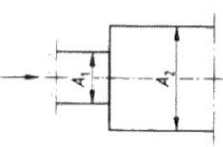
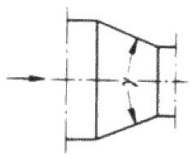
		<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
	1,0	0,6	0,4	0,4
	1,5	0,5	0,4	0,4
	2,0	0,5	0,4	0,4
	3,0	0,6	0,4	0,4
	5,0	0,7	0,5	0,4
	$A_1/A_2$			
	0,4		0,33	
	0,6		0,25	
	0,8		0,15	
	$A_1/A_2$			
	0		1,0	
	0,2		0,7	
	0,4		0,4	
	0,6		0,2	
	0,8		0,1	
	<b>Angolo in gradi</b>			
	30		0,02	
	45		0,04	
	60		0,07	

Tabella 2.4 – Valori del parametro  $r$  al variare della geometria del condotto.

Il tiraggio della canna fumaria può essere migliorato aumentandone l'altezza e/o il diametro (sezione). Entrambe le soluzioni possono essere utili per motivi diversi. Aumentando la sezione del camino, a parità di portata, la velocità dei fumi diminuisce per il principio di conservazione della massa. La portata dei fumi alla bocca del camino deve necessariamente essere uguale a quella che attraversa il comignolo. In questo modo, diminuendo la velocità dei fumi, si riduce l'attrito e quindi le perdite di carico che sono direttamente proporzionali al quadrato della velocità dei fumi.

Il rapporto tra altezza e sezione della canna fumaria viene caratterizzato dalle seguenti considerazioni:

- Aumentando l'altezza della canna fumaria, si aumenta la depressione statica, cioè il tiraggio, accrescendo la spinta del fluido;
- Aumentando il diametro della sezione, si diminuiscono le perdite di carico, cioè gli ostacoli posti al tiraggio stesso. Il risultato è sempre quello di accrescere la spinta.

In conclusione possiamo affermare:

- una canna fumaria molto alta genera una notevole depressione, che può essere sufficiente a vincere la resistenza prodotta dall'attrito dei fumi in una sezione relativamente

stretta;

- una canna fumaria sufficientemente larga può avere una perdita di carico relativamente bassa, tale da essere compensata anche dal tiraggio prodotto da una canna fumaria non particolarmente alta.

In generale all'aumentare dell'altezza di una canna fumaria dovrà diminuire la sua sezione, mentre al diminuire dell'altezza deve allargarsi la sua sezione.

Un criterio di dimensionamento per l'impianto è basato sul rapporto altezza/sezione e la scelta di una coppia di parametri può dipendere, oltre che dai vincoli costruttivi, anche da motivazioni architettonici, estetici o economici. Tuttavia esistono dei limiti naturali: oltre una certa altezza il restringimento della sezione non è più possibile, perché l'attrito e la dispersione termica sarebbero eccessivi, così come non avrebbe senso costruire la canna fumaria bassissima e più larga della superficie del bruciatore.

#### **2.4.3 – Tiraggio disponibile e massa dei fumi**

Il tiraggio disponibile è da considerarsi il motore degli impianti a stufa o caminetto perché rappresenta il lavoro utile netto. Il tiraggio disponibile si ricava dalla pressione statica del camino, o tiraggio naturale, decurtando la somma di tutte le perdite di carico, che rappresentano le resistenze che il fluido deve vincere per poter uscire dal comignolo. Chiaramente affinché il camino funzioni correttamente è necessario che questa differenza sia e rimanga positiva durante tutto il funzionamento dell'impianto. I fattori che agiscono, positivamente o negativamente, su il funzionamento del camino sono:

- l'altezza della canna fumaria;
- la temperatura dei fumi;
- le resistenze per attrito.

Se il tiraggio risulta insufficiente si può quindi agire su uno o più fattori: l'aumento dell'altezza può risultare difficoltoso e antiestetico da realizzarsi, oltre che enormemente costoso; anche l'aumento della temperatura dei fumi rappresenta un onere economico, in quanto implica un aumento della temperatura di combustione e quindi un maggior consumo dello stesso. Il risultato è un peggioramento dell'efficienza dell'impianto. L'unico fattore su cui si può agire per regolare l'impianto e migliorarne l'efficienza è la diminuzione delle perdite di carico. Per ottenere ciò è necessario avere una canna fumaria perfettamente coibentata, con la parete interna liscia, possibilmente circolare per non avere spigoli, di sezione adeguata ed il

più possibile verticale, senza curve, tratti orizzontali, strozzature o allargamenti.

Un altro parametro che classifica i caminetti è la massa dei fumi. Esistono infatti due tipologie di sistemi:

- a caminetto aperto a grande massa di fumi e basso tiraggio;
- a stufa di piccola massa di fumi e forte tiraggio.

#### *1) Caminetto aperto a grande massa di fumi e basso tiraggio*

Questa tipologia di camini richiede un canna fumaria di grande sezione e di conseguenza la portata dei fumi è elevata. La caratteristica di questi caminetti è la temperatura media non molto elevata causata dalla vasta quantità di aria ambiente messa in gioco durante la combustione.

Il sistema però non ha grandi perdite di carico e non necessita di un tiraggio molto forte, inoltre l'ampiezza della canna fumaria porta a ridurre la resistenza della canna stessa, consentendo di smaltire una grande massa di fumi. Quest'ultimi salgono velocemente nel condotto grazie al fatto che sono in quantità elevata e non perché c'è un forte tiraggio.

#### *2) Stufe con piccola massa di fumi e forte tiraggio*

La combustione all'interno della stufa è più lenta rispetto ai camini aperti perché l'afflusso di aria dell'ambiente esterno è minore. La principale causa è che i fumi prodotti dalla combustione risultano più densi in quanto sono meno diluiti. Un'altra caratteristica delle stufe è che presentano una canna fumaria ridotta, non avendo una grande portata di fumi da smaltire.

Le perdite di carico sono maggiori rispetto a quelle presenti in un camino aperto perché si ha la necessità di avere un percorso capace di aumentare la superficie di scambio termico e quindi di creare un percorso più lungo. In queste tipologie di canne fumarie la sezione è più piccola, la velocità dei fumi è maggiore e quindi viene accelerata la combustione mantenendo la temperatura della stessa mediamente più elevata.

#### **2.4.4 – Difetti del tiraggio**

I fattori che maggiormente possono influenzare e determinare il cattivo funzionamento dei camini sono principalmente:

- il vento;
- l'esposizione a punti cardinali e condizioni locali;
- i fattori architettonici interni;
- l'efficienza della stufa;
- i difetti d'installazione;
- tipo di combustibile impiegato.

Analizziamo uno per uno tutti i fattori che influenzano l'efficienza del tiraggio:

### 1) Il vento

Tra tutti i fattori meteorologici e geografici che influenzano il funzionamento di un camino – pioggia, neve, nebbia, altitudine s.l.m., periodo di insolazione - il vento è certamente il più determinante. Il vento crea un tipo di depressione (o sovrappressione) che va ad aggiungersi alla depressione termica indotta dalla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno del camino. Questa depressione prende il nome di *depressione dinamica*. Il vento, agendo sulla canna fumaria, può aumentare o diminuire la depressione nella canna stessa fino al suo azzeramento.

L'azione del vento varia a seconda della natura del fenomeno: un vento *ascendente* ha sempre l'effetto di aumentare la depressione e di conseguenza il tiraggio; un vento *orizzontale*, invece, causa un effetto positivo aumentando la depressione solo nel caso di una corretta installazione del comignolo. Il caso più gravoso è quello di un vento *discendente* che genera sempre una diminuzione della depressione fino ad invertire il segno dell'equazione e a compromettere totalmente il funzionamento del camino.

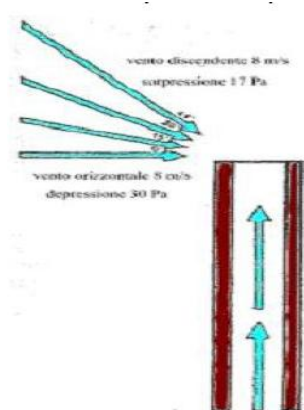


Fig. 2.11 – Esempi di angolazione del vento.

Oltre alla direzione ed alla forza del vento, anche la posizione della canna fumaria e del comignolo rispetto al tetto della casa ed al paesaggio circostante è importante. Con l'ausilio delle figure sottostanti si può meglio intuire come l'orientamento geografico dell'abitazione e la composizione del paesaggio circostante possano influenzare le zone di depressione o sovrappressione.

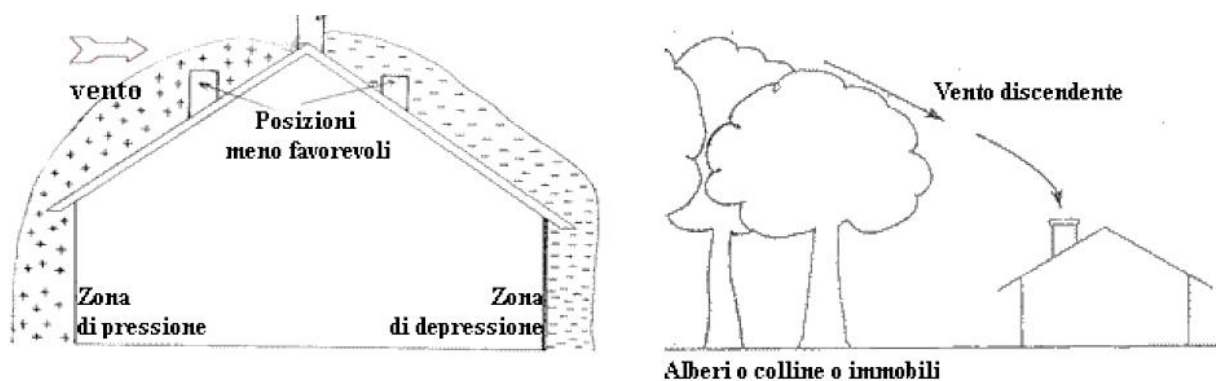


Fig. 2.12 – Zone di depressione o sovrappressione in funzione dell'orientamento geografico.

Il vento influenza il funzionamento del camino sia direttamente attraverso la depressione dinamica, che indirettamente creando delle zone di sovrappressione e di depressione anche all'interno delle abitazioni.

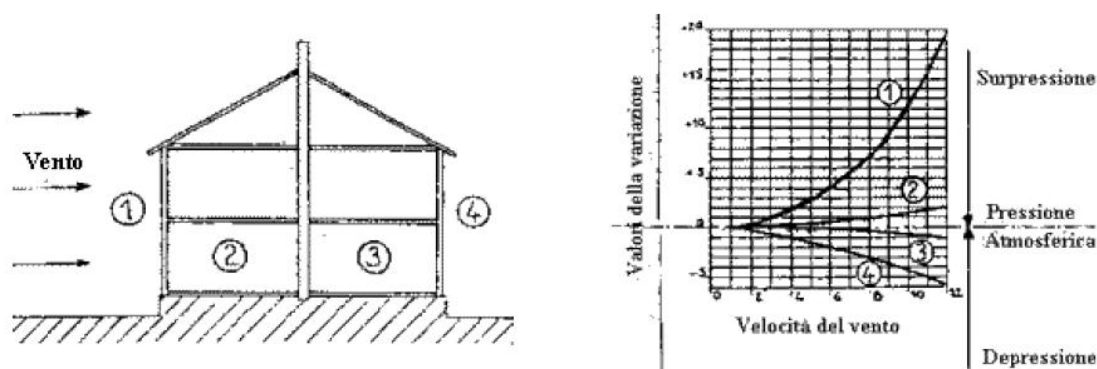


Fig. 2.13 – Zone di depressione o sovrappressione all'interno dell'abitazione.

Negli ambienti direttamente esposti al vento (2) può crearsi un sovrappressione interna che può favorire il tiraggio di stufe e caminetti. Al contrario, negli ambienti opposti alla direzione del vento (3) può crearsi una depressione dinamica che entra in concorrenza con la depressione termica sviluppata dal camino.

## 2) Esposizione ai punti cardinali

Un camino esterno esposto a Nord ad una dispersione termica maggiore di un camino esposto a Sud. I camini esposti a Nord, a causa della scarsa insolazione unita all'effetto del vento, hanno una canna fumaria più fredda e l'aria contenuta al suo interno può diventare più densa e



pesante dell'aria dell'ambiente domestico. Questo potrebbe portare all'inversione del tiraggio naturale. Per ovviare a questo fenomeno bisogna assicurarsi che le pareti interne della canna fumaria si riscaldino sufficientemente vincendo la propria inerzia termica.

I camini in muratura situati esternamente in una zona molto umida, esposti non a Sud, possono essere soggetti ad infiltrazioni di umidità. L'umidità è uno dei peggiori nemici del buon funzionamento di un camino: infatti l'acqua ha un calore specifico molto alto con notevole assorbimento di calore, occorre quindi un'enorme quantità di calore per far evaporare l'umidità del camino prima che quest'ultimo cominci a scaldarsi e, conseguentemente, inizi ad avere un buon tiraggio.

### 3) Fattori architettonici interni

La disposizione degli ambienti della casa, il tipo di finiture adottate, la presenza di altri impianti termotecnici possono influire sul corretto tiraggio di un camino. Nel caso di camini esterni alla casa, l'altezza della canna fumaria influisce negativamente (ciò va in contrasto con quanto visto precedentemente dove, almeno in linea teorica, la maggiore altezza influisce in maniera positiva) in quanto aumentando l'altezza della canna fumaria, si aumenta la superficie esposta alle intemperie causando una maggiore dispersione termica. Poiché il tiraggio di un camino è determinato, oltre che dalla sua altezza, anche dall'alta temperatura dei fumi; un'eccessiva dispersione termica può risultare controproducente.

Un altro elemento architettonico che può compromettere il buon funzionamento del camino è la presenza di rampe di scale nei pressi della stufa. Le rampe di scale costituiscono un camino naturale che convoglia l'aria calda dai piani bassi verso i piani superiori. Questo fenomeno è accentuato se sono presenti tetti e abbaini che presentano una cattiva tenuta o l'abitudine di tenere qualche finestra aperta nei piani superiori. La corrente ascensionale che viene a crearsi tende a mettere in depressione gli ambienti ai piani inferiori che si contrappone alla depressione generata dalla canna fumaria rallentandone il funzionamento.

Anche la presenza di aspiratori elettromeccanici o di cappe ventilate crea forti depressioni che impediscono il corretto funzionamento dei camini. La presenza di due o più camini all'interno dello stesso ambiente è sconsigliabile in quanto l'impianto più potente tende a sottrarre aria comburente agli altri impianti minori, creando dei ritorni di fumo.

#### 4) Efficienza della stufa

L'efficienza della stufa contribuisce a far lavorare più o meno bene la canna fumaria: paradossalmente stufe molto efficienti possono rendere più difficoltoso il lavoro della canna fumaria. Il buon funzionamento del sistema stufa-canna fumaria dipende dall'aumento della temperatura all'interno della canna provocato dai fumi della combustione. Se l'efficienza di una stufa è determinata dalla sua capacità di trasferire la maggior parte del calore prodotto all'ambiente da riscaldare, ne consegue che, tanto maggiore è l'efficienza della stufa, tanto più freddi sono i fumi residui della combustione e, di conseguenza, tanto minore è il tiraggio. Una canna fumaria funziona assai meglio a servizio di un caminetto tradizionale aperto o di una stufa di cattiva qualità, dove la maggior parte del calore viene perduta con i fumi.

#### 5) Difetti di installazione

In parecchi impianti di riscaldamento la stufa non è collegata direttamente alla canna fumaria, ma attraverso un condotto chiamato *canale da fumo* che funge da raccordo tra i due elementi essenziali del camino. Questo elemento dovrebbe essere il più corto possibile per evitare un eccessivo raffreddamento dei fumi, ma molte volte, a causa di problemi architettonici, risulta più lungo del necessario e con tratti inclinati od orizzontali che ne riducono l'efficienza.

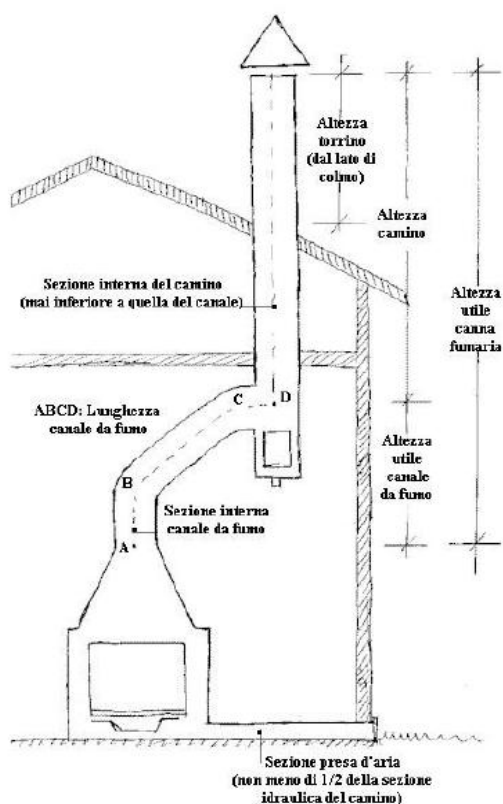


Fig. 2.14 – Esempio di proporzionamento degli elementi del sistema camino.

Come detto in precedenza la dispersione di calore attraverso il canale da fumo abbassa la temperatura dei fumi stessi provocando una perdita di tiraggio e una forte formazione di condensa. Entrambi i difetti portano ad una perdita di efficienza dell'impianto e, a lungo andare, ad un precoce logoramento dei suoi componenti.

Un altro dei più comuni problemi di installazione è la differenza di sezione tra l'uscita dei fumi della stufa e quella d'ingresso nel camino. Se abbiamo a che fare con un caminetto tradizionale aperto, corto, largo e scarsamente coibentato, i fumi in uscita dalla stufa si espandono e diminuiscono di temperatura, riducendo il tiraggio e provocando eccessi di condensa sulle pareti della canna.

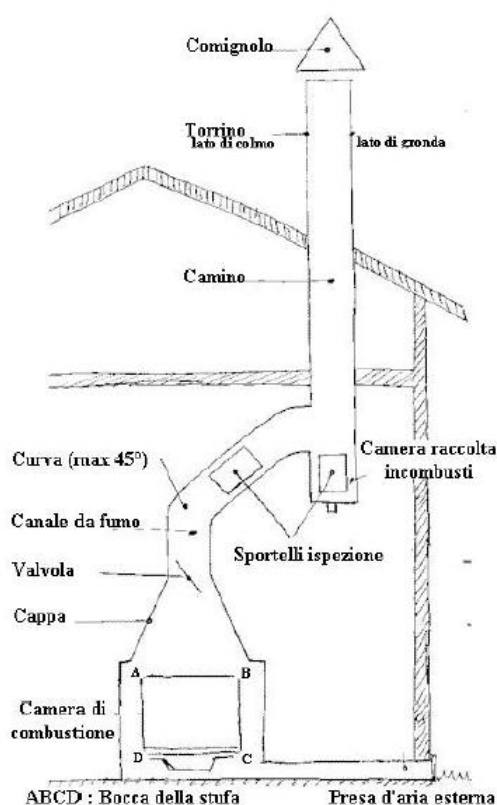


Fig. 2.15 – Nomenclatura degli elementi del sistema camino.

Tra gli errori più comuni in fase di installazione troviamo anche il collegamento di una nuova stufa ad un camino già esistente, lasciando che questo resti al servizio anche del vecchio impianto. Così facendo vi sono due impianti di combustione collegati alla stessa canna fumaria, soluzione sbagliata del punto di vista dell'efficienza e pericolosa per la sicurezza. Se i due impianti di combustione vengono usati contemporaneamente, il carico complessivo dei fumi può risultare eccessivo per la sezione della canna provocando ritorni di fumo negli ambienti interni dell'abitazione; se, invece, viene utilizzata una sola stufa, il calore dei fumi provoca il tiraggio del camino, ma esso aspirerà aria fredda anche dall'apertura dell'impianto spento, raffreddando nuovamente i fumi e bloccando il tiraggio. Se, infine, i due impianti

fossero posti a livelli diversi, oltre ai problemi già citati, si può interferire con lo stesso principio dei vasi comunicanti, provocando un andamento dei fumi di combustione irregolare ed imprevedibile.

#### **6) Tipo di combustibile impiegato**

All'interno della stufa viene inserito il combustibile tipicamente rappresentato della legna. Ci possono tuttavia essere tipi di legna diversi e condizioni del combustibile diverse tali per cui la reazione di combustione abbia una differente efficienza. La legna verde contiene un'alta percentuale di umidità, che influisce sul rendimento della combustione. C'è bisogno di somministrare una maggiore quantità di calore per trasformare l'umidità in vapore acqueo. I fumi, carichi di vapore acqueo, potrebbero avere una temperatura troppo bassa per assicurare un buon tiraggio alla canna.

#### **7) Conseguenze dei difetti del tiraggio**

Lo scarso tiraggio rallenta la combustione, raffredda la stufa, produce ritorni di fumi e aumenta la produzione di monossido di carbonio. Inoltre, diminuisce l'efficienza della stufa e di tutto l'impianto, provocando pericolose incrostazioni di residui incombusti all'interno della canna fumaria.

Anche l'eccessivo tiraggio provoca danni all'impianto: questo si verifica quando al tiraggio termico naturale si somma il tiraggio dinamico. L'eccesso di tiraggio tende a “strappare” la fiamma nella camera di combustione, provocando un surriscaldamento della combustione che porta ad una perdita di efficienza dell'impianto. Una parte dei gas di combustione, unita a particelle di combustibile, viene aspirata all'interno della canna fumaria prima che avvenga la reazione: questo provoca una consistente diminuzione dell'efficienza della stufa o del caminetto e un consumo accelerato di legna combustibile. Inoltre l'aspirazione in canna fumaria di particelle incombuste provoca l'emissione di fumi inquinanti. Infine, l'alta temperatura di combustione, determinata dall'elevata quantità di ossigeno, porta ad una precoce e repentina usura della camera di fuoco.

### ***2.4.5 – Soluzioni pratiche e costruttive***

#### **2.4.5.1 – Eccesso di tiraggio**

L'eccesso di tiraggio può essere contrastato con l'applicazione alla canna fumaria di un

*moderatore di tiraggio*. Esso consiste in un foro nella canna fumaria, posto a valle dell'innesto del canale da fumo, munito di una valvola a farfalla decentrata tenuta normalmente chiusa da un contrappeso regolabile.

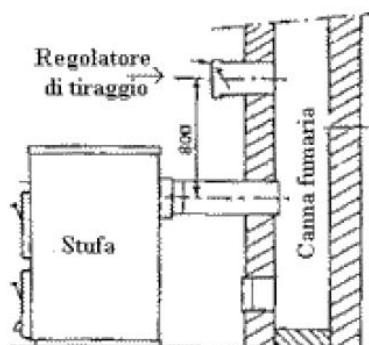


Fig. 2.16 – Esempio di moderatore di tiraggio.

Il moderatore di tiraggio ha il vantaggio di rendere ragionevolmente costante il valore della depressione in canna fumaria, evitando che folate irregolari di vento rendano ingovernabile l'andamento della combustione. Il moderatore di tiraggio ha un funzionamento elementare: quando la depressione interna alla canna fumaria aumenta troppo, la valvola si apre, consentendo l'aspirazione di aria fredda esterna che raffredda i fumi e diminuisce la depressione termica dell'impianto. Viceversa, non appena il valore della depressione ritorna nella norma il contrappeso richiude la valvola, ripristinando la tenuta della canna fumaria. Questa soluzione è altamente economica e presenta una risposta praticamente immediata, rendendola efficace anche contro colpi di vento rapidi ed improvvisi.

#### 2.4.5.2 – Scarso tiraggio

Tutti i camini tradizionali richiedono l'impiego di un *comignolo* che ha il compito di proteggere le pareti interne del camino dall'azione delle intemperie. Il comignolo costituisce un a sorta di tappo che può rallentare la fuoriuscita dei fumi e che, pertanto, richiede l'impiego di particolari soluzioni costruttive che lo rendano il meno possibile di ostacolo ai fumi.

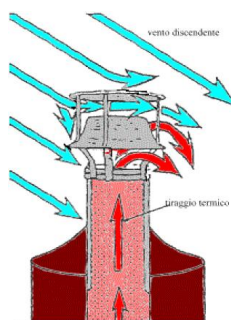


Fig. 2.17 – Esempio di comignolo.

Il comignolo, inoltre, deve essere costruito in modo da ridurre l'effetto negativo dei venti sfavorevoli e sfruttare l'effetto positivo dei venti favorevoli. In sostanza, il comignolo, non è altro che un antivento basato sull'effetto Venturi, capace di aumentare leggermente la depressione in canna fumaria anche in presenza di venti discendenti. Di seguito vengono mostrate delle soluzioni costruttive dei comignoli, alcune efficaci ed altre sconsigliabili:

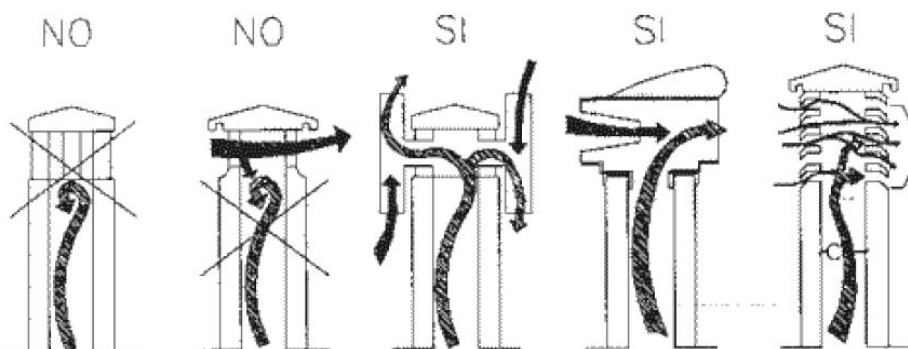


Fig. 2.18 – Soluzioni costruttive dei comignoli.

Un altro accorgimento da tenere in considerazione per combattere lo scarso tiraggio consiste nello sfruttare le *zone di reflusso*: l'effetto del vento sui tetti è quello di creare delle zone di sovrappressione o di depressione che vanno ad influenzare il corretto funzionamento del comignolo. Lo spessore di queste zone varia in funzione della conformazione e dell'inclinazione del tetto; l'accorgimento da tenere in considerazione è quello che il comignolo debba sempre sporgere oltre la zona di reflusso propria del tipo di tetto su cui è posto. Di seguito vengono riportati gli schemi che illustrano le altezze e le distanze richieste per un corretto posizionamento del comignolo:

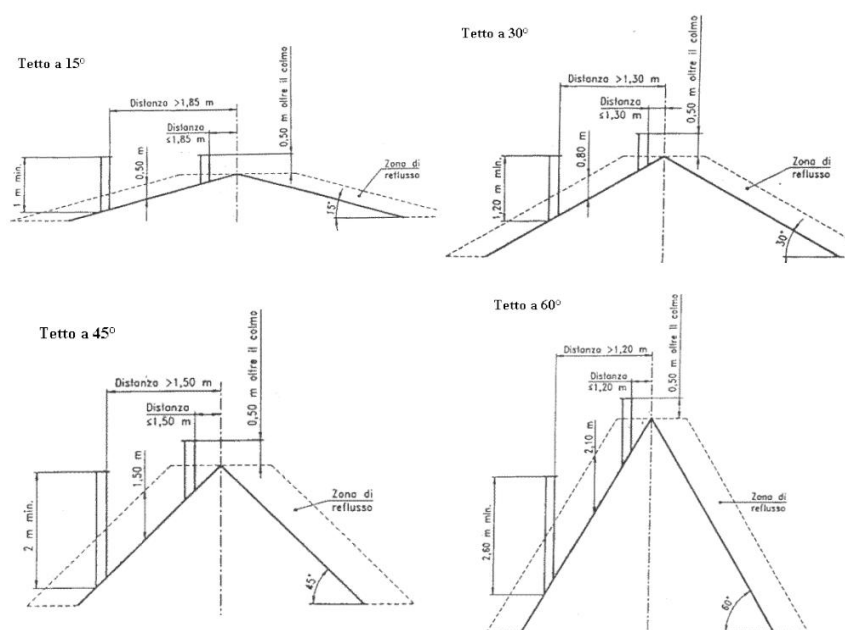


Fig. 2.19 – Esempi di zone di reflusso in funzione dell'inclinazione dei tetti.

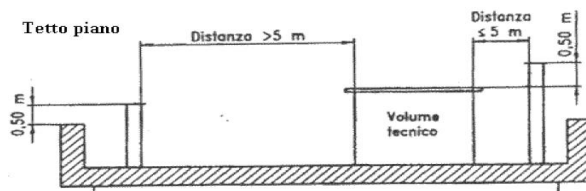


Fig. 2.20 – Zona di reflusso per un tetto piano.

#### 2.4.5.3 – Correggere i difetti di esposizione e di costruzione

Il difetto costruttivo maggiore consiste nel posizionare le canne fumarie esterne in muratura esponendole a Nord. La soluzione migliore sarebbe demolire l'impianto e ricostruirlo esponendola a Sud; tuttavia esistono degli accorgimenti meno invasivi che permettono di migliorare il rendimento del camino. La soluzione più efficace e comunemente utilizzata consiste nell'applicare esternamente un intonaco di qualità, isolante ma traspirante, che protegga le pareti esterne dalle infiltrazioni di acqua piovana.

Il miglior intervento risolutivo consiste invece nel rivestire la parete interna del camino con un tubo di acciaio inossidabile, che permette di avere i seguenti vantaggi:

- la sezione interna liscia e arrotondata consentirà uno scorrimento dei fumi rapido e privo di turbolenze;
- tra la sezione rotonda del tubo in acciaio e la più grande sezione quadrangolare del camino resterà un'intercapedine di aria che funge da isolante termico, migliorando il rendimento del camino stesso;
- il rapido riscaldamento dell'acciaio assicurerà un immediato avvio del tiraggio.

#### 2.4.5.4 – Compensare i problemi architettonici

L'unico modo per evitare che il tiraggio del camino sia afflitto dalla variazioni di pressione interne alla casa (dovute principalmente alla presenza di aspiratori elettromeccanici, rampe di scale, tetti mal isolati, serramenti non a tenuta, ecc.) consiste nel rendere indipendente l'approvvigionamento d'aria, installando un condotto o una feritoia che lo colleghi direttamente con l'esterno. Bisogna tenere presente che la presa d'aria esterna andrebbe collocata sempre dal lato della casa maggiormente esposto al vento, in modo da sfruttare la sovrappressione che esso genera.

#### 2.4.5.5 – Evitare il cattivo combustibile

Per migliorare il rendimento del camino è consigliabile utilizzare solo buona legna secca limitando l'uso di carbone o simili combustibili.

In conclusione, per avere un buon rendimento del camino, oltre ad una corretta manutenzione di tutti gli organi dell'impianto è necessario: progettare e posizionare correttamente il comignolo, prevedere un rivestimento interno della canna fumaria di acciaio inossidabile, installare una presa d'aria tale da favorire il giusto tiraggio e scegliere un buon combustibile da bruciare.

### ***2.5 – Collazione del camino e della canna fumaria***

Collocare un camino all'interno di una stanza è di fondamentale importanza perché consente di dimensionarne tutte le componenti. La dimensione della stanza, pertanto, delimita la dimensione del camino sia in termini estetici che tecnici. Un grande focolare in una piccola stanza può risultare dannoso per gli occupanti, mentre un piccolo focolare in un grande ambiente rischia di non scaldarlo a sufficienza.

La tabella seguente fornisce alcune indicazioni circa le proporzioni consigliate tra la grandezza della stanza e quella della bocca del camino; si tratta di indicazioni di massima e indicative che spesso, come nel caso di camini prefabbricati, non trovano una univoca corrispondenza.

<b>Dimensione stanza (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Larghezza della bocca (cm)</b>	
	Pareti corte	Pareti lunghe
< 16	60	60/80
17/20	70/90	80/90
21/24	80/90	90/100
25/34	80/90	90/120
35/42	80/100	100/120
43/64	90/100	120/150
> 65	100/120	120/180

*Tabella 2.5 – Proporzioni indicative tra larghezza stanza e grandezza camino.*

Un posizionamento funzionale efficace richiede anche una idonea collocazione oltre alla giusta dimensione: porre la bocca del camino troppo vicino ad una porta può provocare correnti d'aria sufficienti a causare sbuffi di fumo. Il camino va collocato anche nel posto



giusto all'interno della stanza giusta; se si colloca il focolare di fronte ad una porta d'ingresso, refoli di vento possono provocare sbuffi di fumo nella stanza ogni volta che la porta viene aperta. Si può ovviare a ciò inserendo un paravento tra il caminetto e la fonte d'aria in movimento.

## **2.6 – Rischio incendio nel camino e nella canna fumaria**

### **2.6.1 – Problemi di installazione**

Il camino rappresenta un elemento domestico ad elevato rischio d'incendio ed è all'origine di parecchi incendi domestici. Si possono individuare quattro possibili situazioni per cui il camino può diventare elemento iniziatore dell'accensione delle fiamme in ambienti domestici:

a) l'emissione di scintille o di materiali incandescenti nella parte aperta del camino bruciano la superficie del pavimento o i rivestimenti delle pareti o del pavimento stesso (carta da parati, tappeti, tendaggi, ecc.); Incendi importanti del primo di questo tipo sono molto rari in quanto la superficie del pavimento in legno difficilmente, seppur investita da scintille, raggiunge la temperatura di autoignizione. Più comune il caso di incendio che parte e si sviluppa da un tappeto o da un paramento domestico.

b) l'emissione di scintille o di materiali incandescenti dal camino che provocano l'accensione di un tetto combustibile (travature o coperture in legno) innescando l'incendio; incendi di questo tipo possono evolversi con dimensioni rilevanti: alla base di questi incendi vi è la scarsa manutenzione delle canne fumarie, nelle quali si accumulano sporcizia, polvere, ragnatele oltre a tutta una serie di materiali combustibili facilmente accendibili da una scintilla proveniente dal fuoco sottostante.

c) l'emissione di scintille o di materiali incandescenti attraverso una fessura creatasi nel camino, o per un difetto dello stesso, provocando l'accensione delle travi in legno della struttura portante o dei solai dell'edificio, adiacenti alla canna fumaria; anche questa tipologia di incendi è abbastanza rara, ma possono provocare ingenti danni. Le cause delle lesioni della canna fumaria si devono a:

- effetto di una scossa sismica o di uno smottamento;
- effetto di un assestamento strutturale dell'edificio;
- mancata osservanza delle indispensabili norme di manutenzione;
- fabbricato vecchio o fatiscente;

- cambiamenti degli impianti di riscaldamento che possono variare il flusso dei fumi nella canna.

d) il surriscaldamento di materiali infiammabili posti in prossimità del camino o della canna fumaria. Quest'ultimo caso è tipico delle canne fumarie in metallo in cui la mancanza d'isolamento tra le pareti metalliche del camino e la struttura lignea esterna può provocare un surriscaldamento di quest'ultima fino a far partire un incendio. La capacità isolante di canne fumarie in pietra, mattoni o calcestruzzo è tale che raramente i camini trasmettono calore sufficiente a danneggiare le travi strutturali.

Il legno strutturale, specialmente se presente in spessori rilevanti, richiede una grande quantità di calore prima di dar luogo alla combustione. Per avere un incendio, infatti, occorre localmente un calore sufficiente a distillare le sostanze volatili del legno. In circostanze normali non si raggiunge questa temperatura in prossimità della superficie esterna delle canne fumarie. Il raggiungimento di una simile situazione si ha, tuttavia, con la rottura dell'isolamento o dell'integrità della canna fumaria; in più l'effetto viene amplificato se il calore in eccesso non ha la possibilità di essere smaltito.

Il legno secco e stagionato è più facilmente accendibile del legno fresco o con un elevato tasso di umidità. L'esposizione continua o ricorrente a temperature elevate ha l'effetto di seccare il legno e di abbassare conseguentemente la temperatura di accensione; è stato dimostrato che l'essiccazione del legno fino a temperature di 275 – 280°C non costituisce un elemento di pericolosità. Diverso è il caso di un'esposizione al calore a temperature di 120°C circa per un periodo prolungato (anche diversi anni). Questa situazione può portare alla decomposizione del legno allo stato di carbone piroforico, avente una temperatura di autoaccensione molto più bassa ed è stato dimostrato che spesso ciò è all'origine di parecchi incendi accidentali. I tempi richiesti al legno per decadere allo stato di carbone piroforico sono tali da poterlo escludere come possibile causa di incendio in edifici recenti e con camini di recente costruzione.

### **2.6.2 – Prevenzione incendi e manutenzione**

Accendere il fuoco in un camino può essere faticoso e dar luogo a comportamenti scorretti, che possono causare situazioni pericolose tali da creare principi di incendi. Di seguito vengono riportate le corrette azioni da intraprendere, con l'ausilio di apposite attrezzature, per accendere un fuoco:

- posizionare la legna su una griglia, affinché i ceppi siano ben aerati e, di conseguenza, si

accendano e si scaldino più facilmente e rapidamente;

- cominciare a scaldare la canna fumaria ed avviare un minimo di tiraggio (magari con un pezzo di carta acceso usato da torcia);
- aiutare l'avvio della combustione utilizzando fogli di giornale accartocciato, pezzetti di legna piccoli e molto secchi ed infine procedere con l'accensione di ciocchi di legna di maggiore dimensione. Questi ciocchi dovranno essere posti con il lato spaccato verso la carta accesa perché il lato ricoperto dalla corteccia si accende con maggiore difficoltà;
- aprire una finestra, almeno per i primi momenti dell'accensione, cosicché il camino ha a disposizione un grande volume d'aria fresca per agevolare il funzionamento del sistema.

Non appena il fuoco sarà acceso si dovrà porre davanti ad esso un parascintille in modo da evitare situazioni spiacevoli che possono causare incendi e, inoltre, non bisognerebbe mai lasciare l'abitazione, nemmeno per brevi periodi, lasciando il fuoco acceso. Inoltre, lanciare dell'acqua non sempre è una buona idea, potrebbe risultare pericoloso ed anche inefficace gettarla su uno strato di carboni vivaci. Il fuoco sembra spegnersi, ma il calore dei carboni può essere tale da far evaporare rapidamente lo strato d'acqua e continuare a bruciare internamente con il risultato che il fuoco potrebbe riaccendersi. La cosa migliore sarebbe separare i ciocchi il più possibile, spingerli verso il fondo del focolare e coprirli con uno strato estremamente abbondante di cenere o di sabbia umida, allontanando dal camino il più possibile gli oggetti ed i paramenti infiammabili. In linea generale sarà utile tenere a portata di mano un estintore efficiente con capacità estinguente idonea allo spegnimento del fuoco.

## **2.7 – Bibliografia**

- I camini moderni tra rischio incendio ed arredamento  
[2006] – C. Manzella
- Nozioni di antincendio  
[2002] – ENEL
- L'investigazione degli incendi  
[1999] – A. Rebuffi
- Riscaldamento, ventilazione, condizionamento, recupero energetico, impianti sanitari  
[1996] – C. Rumor, G. Strohmener
- Appunti del corso di fisica tecnica (Politecnico di Milano)  
[A.A. 2006/2007] – Colombo

# Acciai inossidabili

## 3.1 – Generalità

Gli acciai inossidabili sono leghe a base di ferro, di cromo e di carbonio e anche di altri elementi quali, principalmente il nichel, il molibdeno, il manganese, il silicio, il titanio, ecc. che li rendono particolarmente resistenti ad alcuni tipi di corrosione. Gli acciai inossidabili resistono meglio alle varie tipologie di corrosione a seconda dell'incidenza di vari fattori: reticolo cristallino, presenza di elementi di lega, composizione chimica, ecc. La norma EN 10088 definisce acciai inossidabili quelle leghe ferrose che contengono cromo in ragione di almeno il 10,5%, questo perché la percentuale di cromo in lega determina la caratteristica di queste leghe di ben resistere ad un attacco corrosivo, come si può vedere dal diagramma di Tamman:

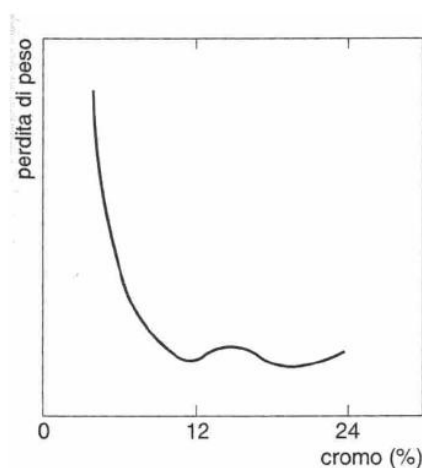


Fig. 3.1 – Curva di Tamman.

Normalmente si considerano contenuti di cromo dal 12 al 30% (il cromo è un elemento facilmente ossidabile e, quindi, tende a formare una pellicola protettiva auto cicatrizzante e continua di ossido) e contenuti di nichel dallo 0 al 35%. Per percentuali di cromo inferiori al 12%, il film di ossido presenta delle discontinuità in corrispondenza delle quali l'acciaio non risulterebbe protetto dalla corrosione. La buona resistenza a corrosione è dovuta alla proprietà

di queste leghe di passivarsi in un ambiente sufficientemente ossidante (ad esempio l'aria), ossia di formare sulla superficie una tenace pellicola di ossido di dimensioni estremamente sottili che protegge il metallo sottostante da ulteriore ossidazione. Le caratteristiche di questa pellicola variano in funzione della composizione chimica della lega, del trattamento termico, della composizione chimica e delle sollecitazioni a cui il materiale è sottoposto.

### 3.2 – Classi di acciai inossidabili

Nella pratica gli acciai inossidabili vengono classificati in base alla propria struttura e normalmente suddivisi nelle seguenti classi:

- acciai martensitici
- acciai ferritici
- acciai austenitici
- acciai austeno-ferritici (duplex)

Per analizzare queste classi si considera che gli elementi caratterizzanti degli acciai inossidabili sono, come già visto, il cromo e il nichel. Questi due elementi hanno effetti opposti sul campo di esistenza del ferro  $\gamma$ : il cromo lo restringe mentre il nichel tende ad estenderlo.

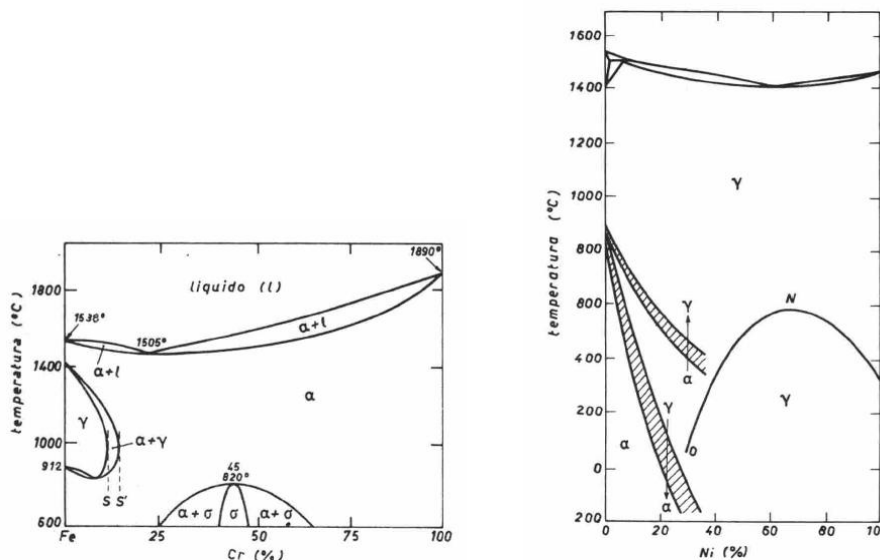


Fig. 3.2 – Diagramma di stato Fe-Cr e diagramma di stato Fe-Ni.

Dalla figura 3.2 (diagramma di stato Fe-Cr) si possono distinguere due zone principali, limitate da un tenore di cromo del 13%. Per tenori inferiori le leghe hanno la possibilità di essere austenitizzate e di subire quindi la trasformazione  $\gamma \rightarrow \alpha$  durante il raffreddamento. Per

tenori sufficienti si può ottenere una fase  $\sigma$  che, per raffreddamenti lenti, precipita nella matrice ferritica oppure ai bordi grani, con un notevole infragilimento della lega stessa. Quest'ultima fase, la fase  $\sigma$ , è un costituente molto duro ed estremamente fragile e pertanto non è desiderabile.

Dalla figura 3.2 (diagramma di stato Fe-Ni) si può vedere come il nichel tende a stabilizzare la presenza dell'austenite fino a temperatura ambiente. La temperatura di trasformazione  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  può variare notevolmente a seconda che essa sia effettuata riscaldando o raffreddando la lega. La costituzione di equilibrio di leghe ternarie Fe-Cr-Ni dipende fortemente dai tenori relativi dei due elementi di lega principali, il cromo e il nichel. L'aggiunta di altri elementi di lega implica una complicazione della trattazione vista fino ad ora: ognuno degli elementi influirà sulla costituzione dell'acciaio in base alla sua maggiore o minore influenza alfabena oppure gammagena. A questo proposito gli elementi di lega si possono suddividere in due categorie:

- elementi che facilitano la formazione della fase  $\gamma$  come il nichel: carbonio, azoto, manganese, rame. . .
- elementi che facilitano la formazione della fase  $\alpha$  come il cromo: silicio, molibdeno, titanio, niobio, tantalio, alluminio. . .

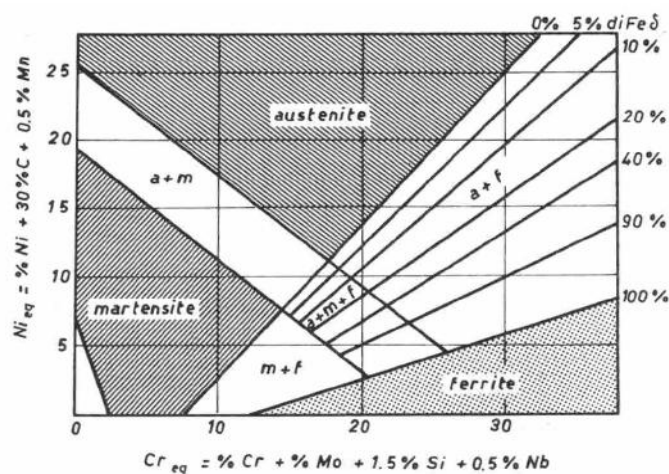


Fig. 3.3 – Diagramma di Schaeffler.

Nel caso in cui siano presenti parecchi elementi di lega può risultare comodo utilizzare il diagramma di Schaeffler (figura 3.4) che considera i tenori di nichel e cromo equivalente e permette di ottenere la microstruttura corrispondente ad una determinata composizione chimica e a determinare condizioni di raffreddamento. Le espressioni analitiche del  $Ni_{eq}$  e  $Cr_{eq}$  sono molteplici e dipendono dal numero di elementi di lega, di seguito ne riporto una versione:

- Nichel equivalente:  $Ni_{eq} = \%Ni + 30 \%C + 0.5 \%Mn$ ;

– Cromo equivalente:  $Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \%Si + 0.5 \%Nb$ .

Un elemento particolarmente importante, che influisce notevolmente sulla struttura è il carbonio: tale elemento gammageno aiuta a stabilizzare l'austenite, ma ha il problema che tende a formare carburi.

Il diagramma in figura 3.4 è stato tracciato per indicare le strutture che possono essere presenti nei cordoni di saldatura, quindi generabili in un bagno fuso che solidifica rapidamente da una temperatura molto elevata, ma può dare una prima idea orientativa della composizione chimica delle tre classi di acciai inossidabili. Esistono, dunque, diverse soluzioni solide, quali la ferrite, l'austenite e zone di transizione in cui esse coesistono. Inoltre è stato studiato che esiste un campo in cui il ferro  $\gamma$  è stabile a temperatura elevata per tenori di cromo superiori al 12% e che tale campo si allarga a valori anche superiori al 15% quando si ha la presenza di carbonio in quantità pari allo 0.2%, questo permette di avere acciai inossidabili che possono essere temprati.

Alla luce di quanto appena esposto si possono caratterizzare le varie classi di acciai inossidabili:

– acciai martensitici: hanno indicativamente un tenore di carbonio compreso tra 0.10 e 0.50% con punte anche di 1% e oltre, un tenore di cromo indicativamente compreso tra 11 e 18%. Possono essere induriti con trattamento termico;

– *acciai ferritici*: hanno indicativamente un tenore di cromo compreso tra 16 e 30% e tenori di carbonio molto bassi, di solito sotto lo 0.1% (si può avere carbonio fino allo 0.35% solo quando il cromo è al limite superiore). Hanno struttura ferritica stabile indipendente dalla temperatura;

– *acciai austenitici*: hanno un tenore di cromo tra 16 e 26% e contengono nichel tra 6 e 22%; il tenore di carbonio è molto basso, al di sotto dello 0.1% (si può avere carbonio fino allo 0.25% solo per i massimi tenori di cromo e nichel). In alcuni tipi di questi acciai parte del nichel è sostituita dal manganese che è un altro elemento austenitizzante. Hanno struttura austenitica stabile indipendente dalla temperatura.

I seguenti diagrammi indicano, a livello qualitativo, il posizionamento delle classi degli acciai inossidabili in funzione delle percentuali di cromo e nichel (figura 3.4) e di cromo e carbonio (figura 3.5).



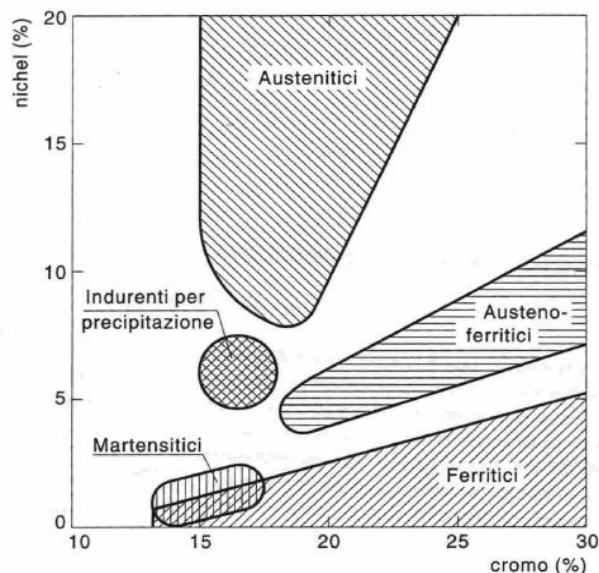


Fig. 3.4 – Classi degli acciai inossidabili in funzione del contenuto di Cr e Ni.

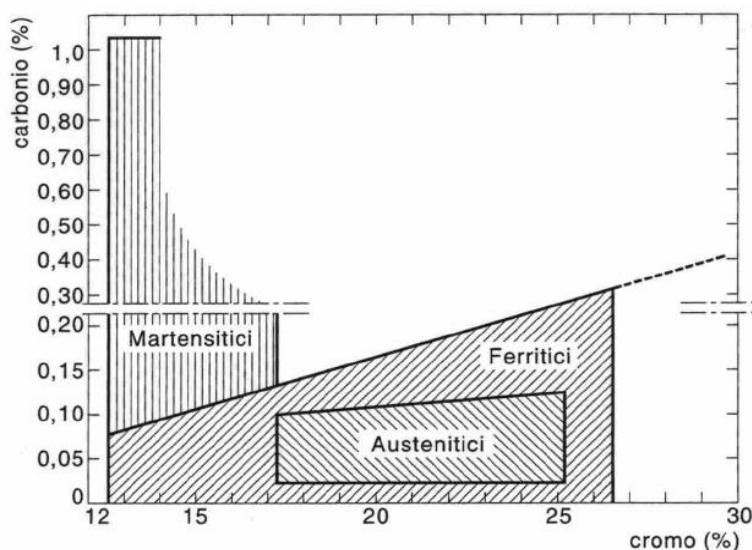


Fig. 3.5 – Classi degli acciai inossidabili in funzione del contenuto di Cr e C.

### 3.2.1 - Acciai inossidabili martensitici

Si tratta di acciai con un tenore di cromo non molto elevato (se si considera il limite del 12%), normalmente intorno al 13% ed un tenore di carbonio superiore allo 0.12%, in modo da presentare ad alta temperatura il campo  $\gamma$  e quindi presentare la possibilità di essere austenitizzati, e quindi temprati. Essi hanno una ottima temprabilità e la loro velocità critica corrisponde ad un raffreddamento in aria. Le loro proprietà meccaniche sono comparabili a quelle di diversi acciai per trattamenti termici.

Nella tabella seguente sono riportate le composizioni chimiche e le proprietà tensili di alcuni dei più diffusi acciai inossidabili martensitici.

Tipo AISI	%C	%Cr	Altri elementi	R <sub>s</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A%
410	0,12	13	-	500	700 - 900	14
420	0,30	13	-	550	750 - 1050	10
431	0,16	16	Ni = 2,00%	600	800 - 1000	14

Tabella 3.1 – Composizione e caratteristiche dei principali acciai inossidabili martensitici.

Gli acciai inossidabili martensitici sono molto più resistenti alle sollecitazioni meccaniche degli austenitici e dei ferritici, proprio grazie alla presenza di martensite nella struttura. Essi sono, tuttavia, meno resistenti alla corrosione chimica.

I trattamenti termici tipici di questi acciai, che vengono effettuati nei diversi stadi di lavorazione, sono la ricottura, la tempra e il rinvenimento. La ricottura ha come obiettivo quello di portare l'acciaio in uno stato di maggiore addolcimento, in modo da poterlo lavorare in maniera più agevole. I trattamenti di rinvenimento servono a dare alla lega una combinazione equilibrata di valori di resistenza meccanica e di resistenza alla corrosione. Generalmente la migliori caratteristiche di resistenza alla corrosione si hanno per rinvenimenti a temperature inferiori di 430°C circa, mentre le migliori caratteristiche di tenacità si ottengono rinvenendo l'acciai nell'intervallo di temperatura 600 – 700°C.

La loro austenitizzazione, anche se effettuata nell'intorno dei 1000°C, non è normalmente completa, in quanto dei carburi del tipo  $M_{23}C_6$  restano non disciolti. Nel loro diagramma CCT essi non presentano la zona bainitica. Invece, la zona perlitica è preceduta da un zona di precipitazione di carburi intergranulari, sempre più importante quanto più la velocità di raffreddamento è lenta. Per evitare questa precipitazione, gli acciai inossidabili martensitici sono normalmente raffreddati in olio.

### 3.2.2 – Acciai inossidabili ferritici

La sezione pseudo-binaria al 17% in Cr mostra che questi acciai hanno una costituzione all'ambiente composta da ferrite+carburi. Durante il riscaldamento si può avere una parziale formazione di fase  $\gamma$ , fino ad ottenere completamente una ferrite  $\delta$ . Nel caso di un rapido raffreddamento si può ottenere una frazione di martensite. Nel caso di un rinvenimento ulteriore è impossibile evitare la formazione di questa fase fragile, mentre è comunque possibile spostare il livello di martensite  $M_s$  al di sotto della temperatura ambiente mediante aggiunte di elementi di lega quali il manganese e/o il molibdeno, oppure stabilizzando con titanio o niobio. Il problema consiste nel fatto che l'aggiunta di titanio o niobio agevola la formazione di carburi o nitruri che comportano un impoverimento della matrice metallica in carbonio o in azoto, con un ulteriore restringimento del campo  $\gamma$ .

Gli acciai inossidabili ferritici sono meno resistenti alla corrosione rispetto agli austenitici, ma sono meno soggetti alla corrosione sotto sforzo. Questi acciai sono maggiormente soggetti alla sensibilizzazione che porta ad una corrosione intergranulare, vista la tendenza del carbonio a precipitare nella matrice ferritica sotto forma di carburi.

La maggiore mobilità degli atomi nelle strutture CCC rispetto alle CFC rende gli acciai ferritici più sensibili all'ingrossamento del grano rispetto agli acciai austenitici. Nella tabella sottostante sono riportate alcune caratteristiche degli acciai inossidabili ferritici più comunemente presenti sul mercato.

<b>Tipo AISI</b>	<b>%C</b>	<b>%Cr</b>	<b>Altri elementi</b>	<b>R<sub>s</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>A%</b>
<b>405</b>	0,06	13	Al = 0,20%	230	450 - 600	20
<b>430</b>	0,08	17	-	250	450 - 650	18
<b>446</b>	0,16	26	N < 0,25%	280	500 - 700	15

*Tabella 3.2 – Composizione e caratteristiche dei principali acciai inossidabili ferritici.*

Gli acciai inossidabili ferritici presentano una transizione duttile-fragile nella curva della resilienza molto evidente. Questa temperatura può essere abbassata diminuendo il tenore degli elementi interstiziali (carbonio e azoto). Diminuendo il livello di questi due elementi interstiziali si ottiene un peggioramento delle caratteristiche meccaniche, ma un sensibile miglioramento della resistenza alla corrosione. La diminuzione della concentrazione di carbonio e azoto ha portato alla produzione di una diversa categoria di acciai inossidabili ferritici detti acciai ELI (Extra – Low Interstitials).

### **3.2.3 – Acciai inossidabili duplex**

Gli acciai duplex, o austeno-ferritici, sono caratterizzati da un contenuto di cromo sempre maggiore del 16% a cui si aggiungono nichel e molibdeno. La composizione media di questi acciai è, quindi, la seguente: cromo tra 18 e 28%, nichel tra 4 e 6%, molibdeno tra 1,5 e 3%. La struttura bifasica di questi acciai è garantita bilanciando in maniera opportuna i tenori di questi elementi. Questa classe di acciai è nata casualmente per un errore di elaborazione di una colata negli anni 30: l'acciaio ottenuto aveva una struttura metallografica che presentava isole di austenite in matrice ferritica.

Questi tipi di acciai sono caratterizzati dall'ottima resistenza alla corrosione (figura 2. ) e dalle buone caratteristiche meccaniche.

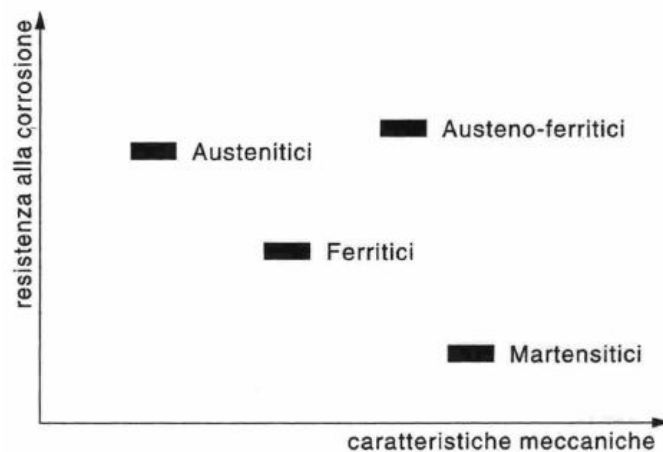


Fig. 3.6 – Confronto tra classi di acciai inossidabili.

Fondamentale per il comportamento di questi acciai è il rapporto tra ferrite e austenite: se aumenta il contenuto di ferrite si riducono le caratteristiche meccaniche e diminuisce la resistenza alla corrosione generalizzata; se aumenta il contenuto di austenite, diminuisce la resistenza alla tensocorrosione. Quando il rapporto tra le due fasi è corretto si instaura un meccanismo di protezione catodica esercitata dalla ferrite sull'austenite.

Gli acciai duplex sono adatti alle applicazioni in cui sono richieste buona saldabilità, elevate caratteristiche meccaniche e resistenza alla corrosione in ambienti difficili (ambiente fortemente acido o acqua di mare). Sono materiali di costo limitato da impiegare in ambienti in cui il pericolo di corrosione sotto tensione non permette l'utilizzo di acciai inossidabili austenitici, mentre la corrosione generalizzata non consente quello degli acciai ferritici.

A temperatura ambiente le caratteristiche meccaniche di questi acciai sono superiori a quelle dei ferritici e permangono anche per effetto dell'incrudimento per deformazione plastica a caldo e a freddo. Per quanto riguarda l'impiego alle alte temperature, gli acciai duplex hanno resistenza a caldo intermedia tra quella degli austenitici e dei ferritici: presentano buone caratteristiche di resistenza all'ossidazione a caldo fino a 1100°C circa. Tuttavia, anche per questi acciai, nelle applicazioni a caldo, bisogna porre attenzione ai fenomeni di precipitazione e di formazione di fase  $\sigma$  nel caso di permanenze più o meno prolungate a temperature attorno ai 475°C e in prossimità di 800°C, essi possono diminuire le caratteristiche meccaniche e la resistenza alla corrosione. Grazie alla presenza dell'austenite, invece, questi acciai sono praticamente esenti dalla fragilità di rinvenimento, fenomeno tipico per gli acciai inossidabili ferritici.

Gli acciai inossidabili duplex vengono posti in esercizio allo stato solubilizzato, cioè dopo un trattamento termico eseguito mantenendo l'acciaio nell'intervallo di temperature compreso tra 1050 – 1150°C ed effettuando un successivo raffreddamento drastico in acqua. Data l'elevata

percentuale di elementi in lega, gli acciai duplex risultano particolarmente sensibili a fenomeni di infragilimento in seguito a prolungate esposizioni ad alta temperatura.

Di seguito verranno descritti in modo più approfondito gli acciai inossidabili austenitici che sono stati considerati nell'analisi delle canne fumarie.

### **3.3 – Acciai inossidabili austenitici**

Si definiscono normalmente acciai inossidabili austenitici le leghe ferro-cromo-nichel con contenuto di cromo dal 12 al 30% e di nichel dal 7 al 35%. Questi acciai hanno una struttura completamente austenitica poiché i loro punti di trasformazione sono a temperature inferiori di quella ordinaria.

L'evoluzione di questi acciai è stata condizionata dalla presenza di un elemento: il carbonio. Inizialmente i primi acciai austenitici prodotti contenevano un tenore di carbonio in media dello 0.25% e a causa di questo elevato tenore erano estremamente sensibili ai fenomeni di corrosione intergranulare. Tale fenomeno è causato dalla precipitazione a bordo di grano di carburi di cromo quando l'acciaio viene riscaldato o raffreddato lentamente nell'intervallo di temperature da 450 a 850°C (l'entità massima della precipitazione si ha a circa 650°C); in questo modo, vicino ai bordi di grano, il tenore di cromo diminuisce localmente e cala la resistenza alla corrosione. In seguito si applicarono accorgimenti per ridurre o evitare questi fenomeni giungendo ai diversi tipi di acciai austenitici oggi esistenti che contengono carbonio da valori inferiori allo 0.03% fino ad un massimo di 0.25%.

All'interno della lega sono presenti altri elementi aggiuntivi che permettono di ottenere determinate caratteristiche.

#### **3.3.1 – Tipi di acciai inossidabili austenitici**

Gli acciai austenitici (come gli altri inossidabili) sono normalmente indicati seguendo la classificazione AISI: formano la “serie 300”.

Per attenuare il pericolo di precipitazione di carburi per prima cosa si ridusse il tenore di carbonio presente in lega, sviluppando l'impiego dei tipi AISI 302 AISI 304 che contengono rispettivamente 0.10% e 0.05% di carbonio.

I tipi AISI 301, AISI 302, AISI 302B, AISI 304, AISI 305, AISI 308, AISI 384 si distinguono per le diverse quantità di nichel che contengono. Questo elemento, infatti, favorisce la diminuzione dell'incrudimento durante le lavorazioni per deformazione plastica. Questi acciai

hanno caratteristiche meccaniche non elevate a temperatura ambiente, ottime a temperature anche molto basse e un'elevata resistenza a fatica.

I tipi AISI 316 e AISI 317 si distinguono, invece, per la presenza di molibdeno che li rende particolarmente resistenti alla corrosione per vaiolatura (pitting corrosion) e più resistenti alla corrosione sotto tensione. Dal momento che il molibdeno è un elemento ferritizzante, per assicurare la stabilità dell'austenite il contenuto di nichel in questi acciai è opportunamente aumentato. Hanno caratteristiche meccaniche migliori degli acciai precedentemente descritti nel caso di temperature mediamente elevate.

Esistono poi acciai austenitici detti *stabilizzanti*, essi contengono elementi – come, ad esempio, titanio o niobio – che possiedono una maggiore affinità chimica per il carbonio rispetto al cromo, così nell'intervallo di temperatura critica precipitano come carburi lasciando quasi inalterato il tenore di cromo risolvendo il problema della corrosione intergranulare. Questi tipi sono il AISI 321, AISI 347 e il AISI 348; essi derivano del AISI 304 con aggiunte di elementi quali titanio, niobio e tantalio. Hanno caratteristiche meccaniche analoghe a quelle del AISI 304 a temperatura ambiente, migliori a temperature più elevate. Esistono anche degli acciai austenitici al molibdeno, che derivano dal tipo 316; essi non sono ancora presenti nella classificazione AISI, ma essendo molto diffusi vengono spesso indicati come AISI 316Ti e AISI316Nb. Hanno caratteristiche meccaniche molto simili al AISI 316. Inoltre, si hanno anche acciai austenitici con un tenore molto basso di carbonio, inferiore allo 0.03%, sono il AISI 304L e il AISI 316L, dove la L indica, appunto, “Low-carbon”.

Come già visto l'aggiunta di elementi e il bilanciamento di cromo e nichel permettono di soddisfare particolari applicazioni. Altri esempi sono il AISI 303 e il AISI 303Se in cui aggiunte di selenio, di zolfo e di fosforo in quantità elevate facilitano le lavorazioni per asportazione di truciolo. I tipi AISI 309 e AISI 310 che contengono i massimi tenori di cromo e nichel che conferiscono alla lega ottima resistenza all'ossidazione e elevate caratteristiche meccaniche alle alte temperature.

### **3.3.2 – Trattamenti termici**

Come si è detto, gli acciai inossidabili austenitici hanno i punti di trasformazione al di sotto della temperatura ordinaria e quindi non si possono effettuare su di essi i tipici trattamenti termici degli acciai; esistono però alcuni trattamenti termici che vengono normalmente applicati a questi acciai.

Un primo trattamento termico, molto diffuso, è la *solubilizzazione*, detta anche “tempra

austenitica". Si riscalda l'acciaio a una temperatura superiore ai 1000°C in modo da poter rimuovere le alterazioni strutturali dovute alla fabbricazione. Si mantiene in temperatura per un tempo tale da mandare in soluzione tutti i carburi e si raffredda rapidamente in modo da avere a temperatura ambiente una struttura austenitica e prevenire la precipitazione dei carburi. Temperatura e tempo di permanenza devono essere le minime necessarie alla solubilizzazione dei carburi e all'eliminazione degli stati di tensione in modo da evitare l'ingrossamento del grano che provoca un aumento della corrosione intergranulare. Il raffreddamento normalmente avviene in acqua.

Un ulteriore trattamento, meno diffuso, è la *stabilizzazione* che si applica agli acciai inossidabili austenitici a basso tenore di carbonio e a quelli stabilizzati al titanio o al niobio per migliorare il comportamento a corrosione intercrystallina. Si riscalda l'acciaio a 885°C e lo si mantiene a questa temperatura in modo che tutte le parti del pezzo vi permangano per due ore e poi si raffredda in aria. Nel caso degli acciai a basso tenore di carbonio (in particolare AISI 316L) il miglioramento si ha soprattutto nei campioni contenenti ferrite in quanto essa si trasforma in fase  $\sigma$  che coagulando migliora la resistenza alla corrosione. Negli acciai stabilizzati al titanio o al niobio, durante il trattamento avviene la precipitazione di TiC e NbC che provoca un impoverimento del grano di questi tre elementi. In questo modo non si ha sufficiente carbonio per la precipitazione di carburi di cromo e la diminuzione di titanio e niobio aumenta la stabilità dell'austenite che ha minori possibilità di trasformarsi in fase  $\sigma$  submicroscopica, dannosa per la resistenza alla corrosione.

Infine, un altro possibile trattamento è la *distensione*. Questo trattamento, però, è difficilmente descrivibile in generale senza considerare le condizioni di esercizio e l'applicazione specifica. In ogni caso gli acciai austenitici possono venire distesi al di sotto dei 450°C poiché al di sotto di tale temperatura non si può avere sensibilizzazione alla corrosione intercrystallina. Si riscalda il materiale ad una temperatura compresa tra 350 e 430°C, lo si mantiene in temperatura per un tempo compreso tra mezz'ora e due ore e lo si raffredda in aria. A volte il trattamento viene usato per le strutture saldate con lo scopo di aumentare la resistenza a corrosione (per esempio corrosione sotto tensione) o di eliminare le tensioni interne, ma in molti casi non si effettua il trattamento. Per gli acciai come il AISI 321 e il AISI 347 spesso al posto della distensione si esegue la stabilizzazione.

### **3.3.3 – Proprietà meccaniche e fisiche**

Gli acciai inossidabili austenitici, allo stato solubilizzato, hanno resistenza a trazione che varia mediamente tra 550 e 650 MPa, carico di snervamento (calcolato convenzionalmente come il

carico per il quale l'allungamento permanente raggiunge lo 0.2% della lunghezza iniziale, dato che il diagramma sforzo-allungamento non presenta un punto singolare di snervamento) particolarmente basso, tra 220 e 350 MPa, duttilità e tenacità elevate. L'allungamento percentuale a rottura è compreso tra 40 e 55%. A livello orientativo il limite di fatica a flessione non si scosta particolarmente dal limite di snervamento. Nella tabella seguente vengono riportati i valori medi delle proprietà fisiche di questi acciai a temperatura ambiente.

<b>Moduli elastici</b>	E (MPa)	200150
	G (MPa)	77000
<b>Coefficiente di Poisson</b>	$\nu$	0,29
<b>Densità</b>	$\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	8
<b>Coefficiente di dilatazione termica lineare</b>	$\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	18 x 10 <sup>-6</sup>
<b>Calore specifico</b>	$c_p$ (J/kg K)	500
<b>Conducibilità termica</b>	k(W/m K)	15
<b>Permeabilità magnetica</b>	$\mu$	< 1,02

*Tabella 3.3 – Valori medi delle proprietà fisiche degli acciai austenitici.*

Da notare il coefficiente di dilatazione termica lineare che è superiore al valore comune per gli acciai con altre strutture (circa 12 x 10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>). Inoltre il dato di permeabilità magnetica evidenzia che gli acciai inossidabili austenitici allo stato solubilizzato ed in assenza di incrudimento sono essenzialmente non magnetici.

È interessante prendere in considerazione l'effetto delle lavorazioni a freddo su questi tipi di acciai: si ha un elevato grado di incrudimento dovuto a modificazioni dell'austenite causata da queste lavorazioni. L'incrudimento dipende dalla composizione chimica dell'acciaio, in particolare dal contenuto di cromo, nichel, carbonio, azoto e manganese. Gli elementi austenitizzanti tendono a diminuire la velocità d'incrudimento, per questo, come si è già detto, aumentando la quantità di nichel diminuisce l'incrudimento alle lavorazioni a freddo. Il grado di incrudimento è importante perché influisce sulle caratteristiche meccaniche e fisiche dell'acciaio: il carico di rottura aumenta e il carico di snervamento in maniera maggiore, la strizione, l'allungamento percentuale e la resilienza diminuiscono fortemente, inoltre il limite di fatica aumenta. Questo comportamento si può benissimo individuarlo nelle seguenti figure:



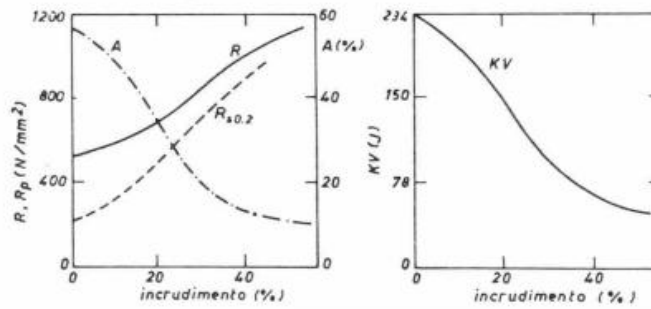


Fig. 3.7 – Andamento delle caratteristiche meccaniche in funzione del grado di incrudimento (AISI 316).

I moduli di elasticità diminuiscono e la permeabilità magnetica aumenta a causa dell'instabilità della struttura austenitica, in questo modo l'acciaio da amagnetico può diventare magnetico (bisogna tenere conto anche della composizione chimica della lega).

Oltre alle proprietà a temperatura ambiente di questi acciai, si devono tenere presenti le caratteristiche alle basse ed alte temperature: per quanto riguarda le basse temperature gli acciai austenitici, grazie alla loro struttura, rimangono tenaci fino a temperature molto basse, carico di rottura e di snervamento e resistenza a compressione aumentano fortemente, mentre allungamento percentuale e strizione diminuiscono solo leggermente come si può notare dalla figura.

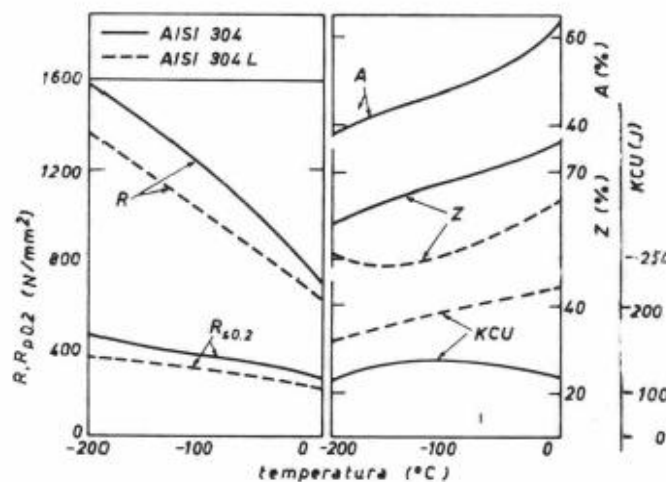


Fig. 3.8 – Proprietà meccaniche a temperature inferiori a quella ambiente.

Le proprietà fisiche subiscono anch'esse delle variazioni: i moduli di elasticità aumentano (ma meno sensibilmente della resistenza meccanica) e la densità cresce. Calore specifico, resistività elettrica, conducibilità termica e dilatazione termica diminuiscono.

Per quanto concerne le alte temperature questi acciai resistono bene all'ossidazione e hanno elevate caratteristiche meccaniche. La resistenza all'ossidazione è conferita dalla presenza del cromo che permette la formazione di strati di ossido che rallentano la velocità di diffusione dell'ossigeno dall'esterno attraverso la zona ossidata. La tenacità e la resistenza meccanica

sono migliorate dal nichel che favorisce la formazione dell'austenite, struttura più resistente e stabile. Il nichel è importante anche perché conferisce una maggiore resistenza alla fatica termica, alla carburazione e alla nitrurazione; in caso di presenza di zolfo nell'atmosfera, però, può essere pericoloso perché si formano solfuri di nichel che possono diminuire l'azione protettiva degli strati superficiali. Quando si lavora a temperature superiori a quella ambiente bisogna porre attenzione alla sensibilità all'infragilimento che può essere dovuta alla precipitazione dei carburi oppure alla separazione della fase  $\sigma$ . La fase  $\sigma$  può originarsi sia da una struttura completamente austenitica (con tenori di cromo sufficientemente elevati e presenza di elementi che favoriscono la separazione) sia da una struttura bifasica austenite-ferrite. La velocità di formazione di questa fase dipende da vari fattori:

- composizione chimica;
- temperatura;
- precedenti trattamenti termici;
- precedenti lavorazioni meccaniche.

La velocità è estremamente lenta a temperatura inferiore ai 600°C e aumenta rapidamente col crescere della temperatura fino ad avvicinarsi alla temperatura limite superiore di esistenza della fase stessa. Per gli acciai inossidabili austenitici al Cr – Ni la massima formazione di fase  $\sigma$  si ha nell'intervallo di temperature tra i 750 e i 900°C. Importanti anche gli altri elementi che compongono la lega: carbonio, azoto e manganese ostacolano la formazione di questa fase, silicio, molibdeno, titanio, niobio e alluminio la favoriscono. Come già accennato la fase  $\sigma$  è un componente duro e fragile, aumenta la durezza e la resistenza a trazione, ma diminuisce la tenacità e la duttilità; la sua presenza altera le proprietà meccaniche a caldo, la resistenza alla corrosione, le proprietà magnetiche e la microstruttura.

Per valutare le proprietà meccaniche alle alte temperature bisogna conoscere il comportamento allo scorrimento viscoso (creep); dai grafici che riportano i risultati di alcune di queste prove si nota che i tipi AISI 310, AISI 316 e AISI 347 hanno migliore comportamento alle alte temperature.

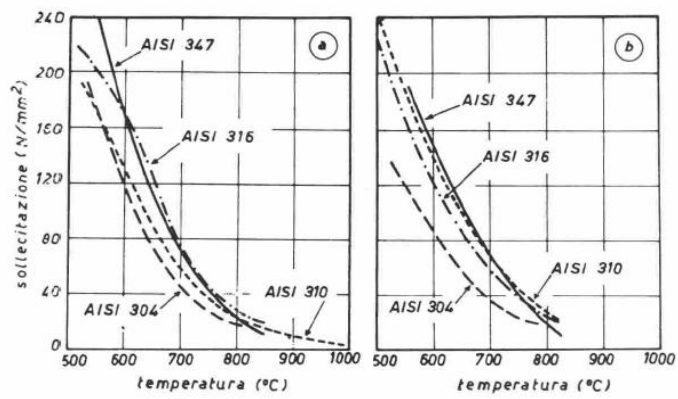


Fig. 3.9 – Valori delle prove di scorrimento viscoso per vari tipi di acciai austenitici.

Anche le proprietà fisiche di questi acciai variano alle alte temperature: moduli d'elasticità e densità diminuiscono; mentre calore specifico, resistività, conducibilità termica e coefficiente di dilatazione termica aumentano.

### **3.4 – Bibliografia**

- Acciai e leghe non ferrose  
[2000] – W. Nicodemi
- Appunti del corso di metallurgia (Politecnico di Milano)  
[A.A. 2007/2008] – M. Boniardi
- ASM handbook, volume 9 (metallography and microstructures)  
[1995]
- Gli acciai inossidabili  
[2003] – G. Di Caprio
- Introduzione agli acciai inossidabili  
[1996] – W. Nicodemi

# Analisi delle lamiere per tubolari di canne fumarie

## *4.1 – Introduzione*

Lo scopo del lavoro di tesi è quello di indagare l'influenza della temperatura e del tempo di esposizione ad una fonte di calore sulla colorazione superficiale di lamiere di spessore 0.6mm (tipico spessore utilizzato per la fabbricazione di canne fumarie) di acciaio inossidabile austenitico del tipo AISI 316. Inoltre, si vuole conoscere la morfologia e la consistenza dello strato di ossido superficiale che ricopre questi campioni al variare dei due fattori di interesse, temperatura e tempo, non che la microstruttura dei campioni. Lo scopo principale rimane quello di rendere il più oggettivo possibile il riconoscimento del colore superficiale delle lamiere investite dal calore: questa analisi, condotta sulle canne fumarie, può risultare utile per una prima analisi qualitativa per qualsiasi tipologia di lavorazione o trattamento termico che preveda una fase di esposizione ad una fonte di calore; saldatura, taglio laser o plasma, trattamenti termici con raffreddamenti repentini, ecc.

Attualmente non esistono riferimenti utili e oggettivi che permettano ad un esperto di riconoscere con esattezza, ad un primo sguardo e osservando solo la colorazione superficiale, quale può essere stato l'andamento della temperatura e ricostruire la storia e il percorso del calore. Inoltre, in letteratura non si trovano articoli relativi a questa tipologia di analisi e lo scopo di questo lavoro di tesi consiste anche nel creare un data base di informazioni che tenta di essere il più esaustivo possibile; tenendo comunque conto delle numerose variabili che possono influire sul risultato dell'analisi.

Riporto di seguito una tabella della British Stainless Steel Association in cui viene indicato qual'è la colorazione della superficie di campioni di acciaio inossidabile esposti per un ora ad una fonte di calore in aria (è importante precisare che l'atmosfera di lavoro è l'aria in quanto il contenuto di ossigeno può influire sulla composizione e sullo spessore dello strato di ossido superficiale).

<b>Colour Formed</b>	<b>Approx Temperature °C</b>
Pale yellow	290
Straw yellow	340
Dark yellow	370
Brown	390
Purple brown	420
Dark purple	450
Blue	540
Dark blue	600

*Tabella 4.1 – Tabella indicativa dei colori della British Stainless Steel Association.*

Questa tabella è un primo approccio per capire qualitativamente la gamma di colori che può assumere un campione di acciaio inossidabile austenitico, ma risulta essere del tutto soggettiva e lascia spazio a molte interpretazioni. Senza contare che la differenza tra giallo pallido e giallo paglierino non a tutti è nota.

Il lavoro che è stato portato avanti consiste nel trovare un parametro oggettivo di identificazione della colorazione superficiale delle lamiere di acciaio inossidabile. Il percorso scelto consiste nell'eseguire delle fotografie, con fotocamere digitali, in una camera bianca, posta all'interno di una stanza buia, in cui il fascio di luce generato da due lampade, incide perpendicolarmente alla macchina fotografica. L'oggettività e l'unicità del colore vengono garantite dagli istogrammi dei colori di base, rosso, verde e blu, che combinati insieme danno il colore. Il parametro scelto è la media dei colori rosso, verde e blu che verrà utilizzata per un'analisi statistica sull'influenza dei due fattori principali, temperatura e tempo, e sulla fotocamera; è stato scelto di eseguire la fotografie con due fotocamere con caratteristiche simili per valutare, prima di tutto, la bontà della camera bianca e, se cambiando fotocamera, si riscontrano delle differenze sulle medie degli istogrammi.

Una volta raccolti tutti i dati, attraverso l'uso di un software statistico, è stata eseguita un'analisi della varianza – ANOVA – per indagare circa l'influenza dei parametri e per svolgere dei confronti tra i vari livelli dei fattori; questi confronti servono a stabilire effettivamente se cambia il colore superficiale.

Infine, sono state svolte delle analisi microscopiche con un microscopio a scansione elettronica a grandi ingrandimenti (S.E.M.) per evidenziare la composizione chimica e la morfologia del film di ossido sulla superficie e delle analisi micrografiche per valutare un'eventuale modifica della struttura interna.

## 4.2 – Programma degli esperimenti

### 4.2.1 – Riscaldamento campioni

Prima di cominciare le prove pratiche sono stati pianificati i livelli dei due fattori principali; la scala di temperature scelta parte dal riferimento a temperatura ambiente, 20°C, e arriva fino a 1050°C con passo che varia in funzione delle temperature di maggiore interesse. Si è scelto di indagare maggiormente nell'intervallo di temperature che va dai 300°C ai 500°C perché in quest'intervallo cominciano i cambiamenti di colorazione superficiale e sono le temperature più frequentemente raggiunte durante gli incendi domestici. Il limite superiore è stato fissato sempre dal contesto in quanto difficilmente gli incendi domestici raggiungono temperature superiori a 950 – 1050°C.

Per quanto riguarda il tempo di esposizione alla fonte di calore si è scelto di far variare questo parametro tra due livelli: un'ora e sei ore. La scelta di un tempo di esposizione di un'ora è stata quasi obbligata per avere un raffronto numerico con la tabella della British Stainless Steel Association, mentre di rado gli incendi domestici hanno una durata complessiva superiore alle 5 – 6 ore.

Ogni lamiera è stata tagliata a freddo mediante cesoie ottenendo così dei campioni quadrati di dimensione 80 x 80mm. La finitura superficiale è dettata dalla lavorazione subita: sono tutti campioni laminati non trattati superficialmente, ma puliti con dell'acetone per eliminare tutti i residui di olio, pennarello, sporco, ecc.

Il piano sperimentale prevede di effettuare due repliche per ciascuna condizione e ogni campione viene marcato e codificato secondo una precisa sequenza: vengono indicati temperatura [°C], tempo di esposizione [h], tipo di acciaio [AISI], spessore lamiera [mm] e numero di replica [A o B]. Nella seguente tabella vengono indicati i nomi dei campioni secondo la codifica.

<i>Tempo [h]</i>	1		6	
<i>Replica</i>	A	B	A	B
<i>Temperatura [°C]</i>				
20	20-1-316-06-A	20-1-316-06-B	20-6-316-06-A	20-6-316-06-B
150	150-1-316-06-A	150-1-316-06-B	150-6-316-06-A	150-6-316-06-B
225	225-1-316-06-A	225-1-316-06-B	225-6-316-06-A	225-6-316-06-B
300	300-1-316-06-A	300-1-316-06-B	300-6-316-06-A	300-6-316-06-B
340	340-1-316-06-A	340-1-316-06-B	340-6-316-06-A	340-6-316-06-B

375	375-1-316-06-A	375-1-316-06-B	375-6-316-06-A	375-6-316-06-B
415	415-1-316-06-A	415-1-316-06-B	415-6-316-06-A	415-6-316-06-B
450	450-1-316-06-A	450-1-316-06-B	450-6-316-06-A	450-6-316-06-B
525	525-1-316-06-A	525-1-316-06-B	525-6-316-06-A	525-6-316-06-B
600	600-1-316-06-A	600-1-316-06-B	600-6-316-06-A	600-6-316-06-B
750	750-1-316-06-A	750-1-316-06-B	750-6-316-06-A	750-6-316-06-B
900	900-1-316-06-A	900-1-316-06-B	900-6-316-06-A	900-6-316-06-B
1050	1050-1-316-06-A	1050-1-316-06-B	1050-6-316-06-A	1050-6-316-06-B

Tabella 4.2 – Nomenclatura dei campioni.

La prima fase dall'attività di analisi prevede il riscaldamento di tutti i campioni secondo una sequenza completamente casualizzata. Prima di stendere la sequenza di riscaldamento è necessario precisare alcune ipotesi su cui è stata sviluppata l'analisi:

– legge di riscaldamento a gradino: è stata imposta una legge di riscaldamento a gradino vista la mancanza di informazioni sul riscaldamento seguito dal componente durante l'incendio. Questa ipotesi è supportata dal piccolo spessore dei componenti (inferiore al millimetro) che fa supporre un riscaldamento molto rapido una volta investiti dal flusso di calore.

– Raffreddamento in aria: questa scelta è dovuta alla mancanza di informazioni sul mezzo di spegnimento, perciò si è scelto il caso più semplice, forte del fatto che in un incendio vi sono sempre zone che non entrano in contatto con l'acqua.

– Assenza di fiamma: è stata dettata dalla mancanza di un forno adeguato. Tale ipotesi non penalizza l'analisi perché in un incendio vi sono ampie zone che non entrano in contatto diretto con il fuoco, ma subiscono ugualmente il flusso di calore.

– Provino ovunque alla stessa temperatura: questa ipotesi di omogeneità termica è fortemente supportata dal piccolo spessore del provino che quindi si riscalda e si raffredda molto velocemente senza presentare gradienti termici rilevanti al loro interno.

Il riscaldamento è stato effettuato in un forno elettrico a resistenza secondo la seguente sequenza casualizzata tramite il software Minitab Solution 15. Prima di iniziare il riscaldamento dei lamierini, questi vengono puliti con dell'acetone per eliminare i residui di sporco e grasso che potrebbero influenzare l'analisi; di seguito viene riportata la sequenza:

<b>1</b>	900-1-316-06-A	<b>13</b>	450-1-316-06-A	<b>25</b>	525-1-316-06-A	<b>37</b>	600-1-316-06-A
<b>2</b>	340-6-316-06-B	<b>14</b>	225-6-316-06-B	<b>26</b>	150-1-316-06-A	<b>38</b>	450-6-316-06-A
<b>3</b>	900-6-316-06-A	<b>15</b>	1050-6-316-06-B	<b>27</b>	600-1-316-06-B	<b>39</b>	600-6-316-06-B
<b>4</b>	375-6-316-06-B	<b>16</b>	150-1-316-06-B	<b>28</b>	1050-6-316-06-A	<b>40</b>	415-6-316-06-B



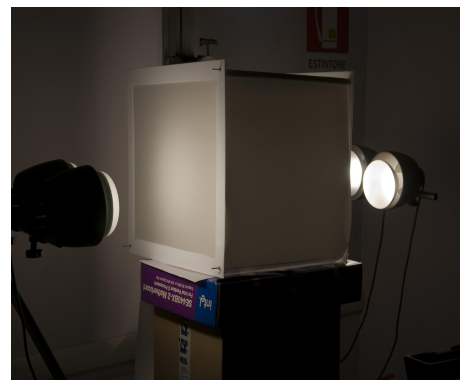
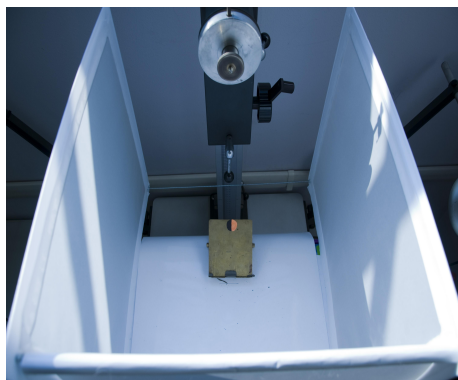
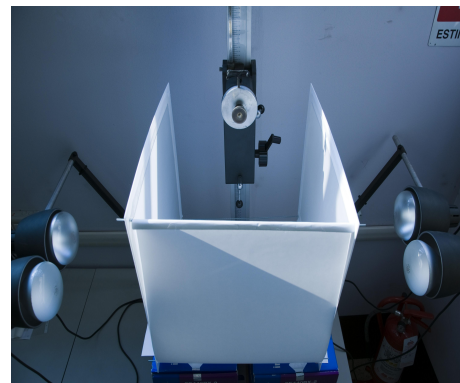
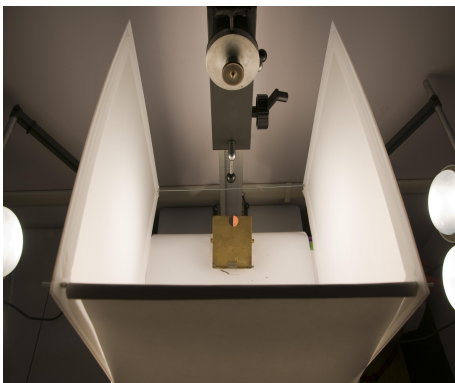
<b>5</b>	300-6-316-06-B	<b>17</b>	525-6-316-06-A	<b>29</b>	750-6-316-06-B	<b>41</b>	415-1-316-06-A
<b>6</b>	900-1-316-06-B	<b>18</b>	900-6-316-06-B	<b>30</b>	225-1-316-06-A	<b>42</b>	750-1-316-06-B
<b>7</b>	300-1-316-06-B	<b>19</b>	150-6-316-06-A	<b>31</b>	225-6-316-06-A	<b>43</b>	1050-1-316-06-A
<b>8</b>	525-1-316-06-B	<b>20</b>	600-6-316-06-A	<b>32</b>	300-6-316-06-A	<b>44</b>	375-1-316-06-A
<b>9</b>	750-6-316-06-A	<b>21</b>	750-1-316-06-A	<b>33</b>	375-1-316-06-B	<b>45</b>	340-1-316-06-A
<b>10</b>	150-6-316-06-B	<b>22</b>	340-6-316-06-A	<b>34</b>	450-1-316-06-B	<b>46</b>	375-6-316-06-A
<b>11</b>	415-1-316-06-B	<b>23</b>	450-6-316-06-B	<b>35</b>	225-1-316-06-B	<b>47</b>	415-6-316-06-A
<b>12</b>	340-1-316-06-B	<b>24</b>	1050-1-316-06-B	<b>36</b>	525-6-316-06-B	<b>48</b>	300-1-316-06-A

Tabella 4.3 – Sequenza di riscaldamento.

Una volta scaldati i lamierini sono stati marcati sul lato che presenta il colore meno uniforme, con il codice prima citato.

#### 4.2.2 – Analisi fotografica: light box e fotocamere

L'analisi della colorazione superficiale dei campioni prevede di eseguire le fotografie con due diverse tipologie di fotocamere all'interno di una camera bianca immersa in una stanza buia in modo da avere una rilevazione che sia il più corretta possibile. La lamiera viene appoggiata su una squadretta inclinata e posta all'interno del light box dove la macchina fotografica è montata perpendicolarmente ai campioni.



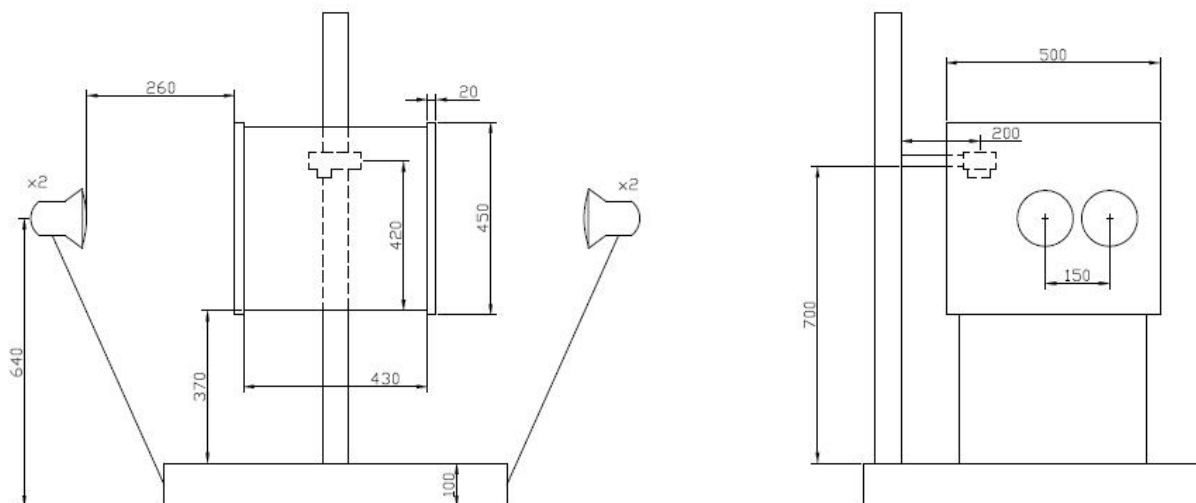


Fig. 4.1 – Immagini e dimensioni di ingombro del light box.

Sulla squadretta è stato posto un cerchio nero e arancione che ha il solo scopo di servire come riferimento per la messa a fuoco della fotocamera. Il light box è stato costruito con normalissimi fogli di carta bianca facilmente reperibili e la luce incide direttamente sul campione per non alterare il colore.

Per l'analisi cromatica sono state scelte due fotocamere dalle caratteristiche simili e della stessa fascia di prezzo; la prima fotocamera è una Canon Eos 450D mentre la seconda è una Nikon D300. Di seguito vengono riportate le caratteristiche delle due macchine fotografiche:

**Canon Eos 450D:**



Fig 4.2 – Immagine della fotocamera Canon Eos 450D.

- sensore: CMOS di dimensioni 22.2 x 14.8mm da 12.2 megapixel;
- esposizione manuale con gamma di esposizione EV 1 – 20 e compensazione  $\pm 2$  EV;
- sensibilità ottica: ISO 100 – 1600;
- bilanciamento bianco: manuale e/o automatico;
- dimensioni [mm]: 128.6 x 97.5 x 61.9;

- peso [g]: 475;
- materiale corpo camera: acciaio inossidabile / plastica;
- mirino: ottico pentaspecchio con copertura campo 95% e ingrandimento 0.87x;
- velocità di scatto [sec]: 30 – 1/4000;
- formato immagini: JPEG, TIFF e RAW;
- display LCD da 3” con risoluzione 230000 pixel.

***Nikon D300:***



*Fig. 4.3 – Immagine della fotocamera Nikon D300.*

- sensore: CMOS di dimensioni 15.8 x 23.6mm da 12.3 megapixel;
- esposizione manuale con gamma di esposizione EV 0 – 20 e compensazione  $\pm 5$  EV;
- sensibilità ottica: ISO 200 – 3200;
- bilanciamento bianco: manuale e/o automatico;
- dimensioni [mm]: 147 x 114 x 74;
- peso [g]: 825;
- materiale corpo camera: lega di magnesio;
- mirino: ottico pentaprisma con copertura campo 100% e ingrandimento 0.94x;
- velocità di scatto [sec]: 30 – 1/8000;
- formato immagini: JPEG, TIFF e NEF (RAW);
- display LCD da 3” con risoluzione 920000 pixel.

Pur essendo molto simili le due fotocamere presentano delle piccole differenze legate al tipo di messa a fuoco, al sensore, alla sensibilità, all'esposizione, ecc. che potrebbero dar luogo a delle differenze sulle fotografie. Per questo motivo oltre all'ausilio della camera bianca per ridurre la possibile influenza della luce, si è scelto di utilizzare anche un software di taratura del bianco e del colore; il programma utilizzato, chiamato ColorChecker Passport della società X-Rite è facilmente reperibile sul mercato e il suo utilizzo è molto agevole. Il ColorChecker Passport è un sistema formato da un software per creare il profilo camera e da una parte hardware composta da varie carte che servono a bilanciare sia il bianco che i colori.



Fig. 4.4 – Target del bilanciamento del bianco e del colore.

Le carte ColorChecker Passport hanno la caratteristica di essere realizzate pigmenti virtualmente esenti da metamerismo, cioè la percezione che si ha del colore non varia al variare della luce sotto cui la si osserva. Queste carte sono utilissime per bilanciare il bianco e il grigio soprattutto quando si fotografa in modalità RAW. Il target a 24 colori (riportato in figura 4.4) dovrebbe essere fotografato prima di qualsiasi altro scatto in modo da poter riuscire a creare un profilo unico per tutte le foto successive. I 24 riferimenti cromatici raccolgono una serie di colori rappresentativi di varie situazioni tra cui le tinte pure RGB oltre alla scala di grigi neutri che va dal bianco al nero. Questo target rappresenta un modo univoco di calibrazione del colore della fotocamera.



Fig. 4.5 – Target del bilanciamento colore per ritratti e paesaggi.

Quest'altro target, sempre compreso nell'hardware del ColorChecker Passport, permette di

realizzare delle immagini più creative; oltre ad avere una scala di colori per la taratura (1) e una per le tonalità di grigio (4), permette di modificare l'intensità dei colori dei ritratti (2) e dei paesaggi (3).

Come già anticipato, il software presente nel pacchetto ColorChecker Passport permette di creare il profilo della fotocamera: per prima cosa bisogna scattare una fotografia del target, inquadrando completamente tutti e 24 i colori del Passport, evitando che le singole caselle dei colori vengano coperte. Successivamente la foto viene aperta in formato RAW ed asportata in DNG in modo che possa essere letta dal programma. Aprendo il programma, il software riconosce in maniera automatica le caselle dei colori e crea il profilo della fotocamera salvando l'immagine per poter poi sincronizzare tutte le altre.

#### **4.2.3 – Analisi fotografica: fotografie e istogrammi RGB**

Per ogni lamiera scaldata è stato deciso di scattare quattro fotografie in modo da mascherare la possibile variabilità del colore dei campioni. Per avere un risultato scientificamente valido è necessario generare un piano sperimentale totalmente casualizzato: la casualizzazione prevede di seguire un piano fotografico con quattro repliche per ogni campione senza bloccare la macchina fotografica.

La macchina fotografica poteva rappresentare un fattore di disturbo e quindi si poteva considerare come un blocco all'interno del piano fattoriale, ma considerando tutte le precauzioni prese, dal light box in una camera buia, alla taratura dei colori e bilanciamento del bianco attuate con il ColorChecker Passport, si è scelto di aggiungere anche la fotocamera come fattore. Il piano di seguito riportato riprende la codifica precedentemente descritta a cui viene premessa una lettera, stante ad indicare la fotocamera; con la lettera C vengono indicate le fotografie effettuate con la fotocamera Canon Eos 450D, mentre con la lettera N quelle scattate con la Nikon D300. Infine vengono aggiunti in fondo al codice i numeri da 1 a 4 che indicano, in progressivo, il numero delle repliche.

<i>Sequenza di scatto</i>	<i>N°</i>
C-450-1-316-06-A-1	1
C-150-6-316-06-A-1	2
C-340-6-316-06-B-1	3
N-525-1-316-06-A-1	4
N-340-1-316-06-A-1	5
C-750-6-316-06-B-1	6
N-300-1-316-06-B-1	7

<i>Sequenza di scatto</i>	<i>N°</i>
N-150-1-316-06-B-2	209
C-20-1-316-06-B-1	210
C-20-6-316-06-A-3	211
N-450-6-316-06-B-1	212
C-750-6-316-06-A-2	213
C-900-6-316-06-A-2	214
N-20-6-316-06-A-4	215

C-150-1-316-06-B-1	8
C-340-6-316-06-A-1	9
C-1050-1-316-06-B-1	10
N-750-1-316-06-A-1	11
C-450-6-316-06-A-1	12
N-20-6-316-06-A-1	13
C-415-1-316-06-A-1	14
N-900-1-316-06-B-1	15
N-750-1-316-06-B-1	16
C-375-6-316-06-B-1	17
C-415-1-316-06-B-1	18
C-415-1-316-06-B-2	19
C-415-6-316-06-B-1	20
C-20-1-316-06-A-1	21
N-525-6-316-06-A-1	22
N-150-6-316-06-B-1	23
C-600-1-316-06-A-1	24
N-375-1-316-06-B-1	25
N-525-1-316-06-A-2	26
C-525-6-316-06-A-1	27
N-150-6-316-06-B-2	28
C-150-6-316-06-B-1	29
C-150-1-316-06-A-1	30
C-340-1-316-06-B-1	31
C-525-6-316-06-A-2	32
C-1050-6-316-06-B-1	33
N-150-6-316-06-A-1	34
N-150-1-316-06-B-1	35
C-525-1-316-06-A-1	36
C-415-6-316-06-A-1	37
N-900-6-316-06-A-1	38
C-225-1-316-06-A-1	39
C-1050-1-316-06-A-1	40
C-375-1-316-06-B-1	41
N-450-1-316-06-B-1	42
C-750-1-316-06-A-1	43
C-300-1-316-06-A-1	44
N-415-6-316-06-B-1	45
C-340-6-316-06-B-2	46
C-750-6-316-06-B-2	47
N-525-6-316-06-B-1	48
N-750-1-316-06-B-2	49

C-20-6-316-06-B-3	216
N-600-6-316-06-B-4	217
N-20-1-316-06-B-4	218
C-375-1-316-06-A-2	219
C-1050-1-316-06-B-4	220
N-225-6-316-06-A-4	221
N-375-6-316-06-B-1	222
C-225-6-316-06-A-3	223
N-450-1-316-06-B-3	224
C-750-6-316-06-B-4	225
N-150-6-316-06-A-3	226
C-415-1-316-06-A-3	227
C-750-1-316-06-A-2	228
N-450-6-316-06-A-1	229
N-225-6-316-06-B-2	230
C-20-6-316-06-A-4	231
C-375-6-316-06-B-2	232
N-1050-6-316-06-B-1	233
N-1050-6-316-06-B-2	234
C-225-1-316-06-B-3	235
N-1050-6-316-06-A-4	236
N-225-1-316-06-A-3	237
N-1050-6-316-06-B-3	238
C-340-1-316-06-A-2	239
N-750-1-316-06-A-2	240
C-750-1-316-06-A-3	241
C-450-6-316-06-A-3	242
C-415-6-316-06-A-4	243
N-415-1-316-06-A-3	244
C-750-6-316-06-A-3	245
N-900-6-316-06-B-2	246
N-225-1-316-06-B-3	247
C-415-1-316-06-B-3	248
C-340-6-316-06-B-4	249
C-340-1-316-06-A-3	250
C-20-1-316-06-A-3	251
C-450-1-316-06-B-1	252
C-375-1-316-06-A-3	253
N-375-1-316-06-B-4	254
N-300-6-316-06-B-1	255
N-900-1-316-06-A-4	256
C-1050-6-316-06-A-3	257

C-300-6-316-06-B-1	50
N-300-1-316-06-A-1	51
N-415-6-316-06-A-1	52
N-1050-1-316-06-B-1	53
C-600-6-316-06-B-1	54
C-150-1-316-06-B-2	55
N-415-1-316-06-A-1	56
N-300-1-316-06-B-2	57
N-340-6-316-06-B-1	58
C-20-6-316-06-B-1	59
C-300-1-316-06-A-2	60
N-900-1-316-06-B-2	61
N-340-6-316-06-A-1	62
N-150-1-316-06-A-1	63
C-450-6-316-06-B-1	64
C-415-6-316-06-A-2	65
N-450-1-316-06-A-1	66
C-525-1-316-06-B-1	67
C-340-6-316-06-B-3	68
C-750-6-316-06-B-3	69
N-20-1-316-06-B-1	70
N-900-1-316-06-B-3	71
N-20-6-316-06-A-2	72
C-525-6-316-06-B-1	73
N-225-1-316-06-B-1	74
N-20-1-316-06-B-2	75
N-340-1-316-06-A-2	76
C-150-1-316-06-B-3	77
C-900-1-316-06-A-1	78
C-20-6-316-06-A-1	79
N-1050-6-316-06-A-1	80
C-150-1-316-06-A-2	81
C-225-6-316-06-A-1	82
N-600-6-316-06-A-1	83
N-1050-6-316-06-A-2	84
N-225-6-316-06-A-1	85
C-300-6-316-06-B-2	86
N-150-6-316-06-B-3	87
C-300-1-316-06-B-1	88
N-600-1-316-06-B-1	89
C-900-1-316-06-B-1	90
C-300-6-316-06-A-1	91

C-375-1-316-06-A-4	258
N-415-6-316-06-A-2	259
N-600-1-316-06-B-4	260
C-600-1-316-06-B-2	261
N-1050-1-316-06-A-2	262
C-150-1-316-06-A-3	263
N-415-6-316-06-A-3	264
C-600-1-316-06-A-4	265
N-450-6-316-06-B-2	266
C-600-6-316-06-B-3	267
C-300-1-316-06-A-4	268
N-750-1-316-06-A-3	269
N-750-6-316-06-B-2	270
N-750-6-316-06-A-3	271
N-340-1-316-06-B-2	272
C-450-6-316-06-B-3	273
C-340-6-316-06-A-4	274
C-375-6-316-06-B-3	275
N-225-1-316-06-A-4	276
N-340-6-316-06-B-3	277
N-600-1-316-06-A-1	278
N-450-6-316-06-A-2	279
N-750-6-316-06-A-4	280
C-1050-6-316-06-B-2	281
N-300-6-316-06-B-2	282
C-415-1-316-06-A-4	283
C-525-6-316-06-B-4	284
C-150-6-316-06-B-3	285
N-415-1-316-06-B-4	286
C-375-1-316-06-B-3	287
C-1050-1-316-06-A-2	288
C-225-6-316-06-B-2	289
C-900-6-316-06-A-3	290
N-450-6-316-06-A-3	291
C-750-1-316-06-B-4	292
N-225-1-316-06-B-4	293
N-415-6-316-06-A-4	294
N-375-1-316-06-A-2	295
C-525-1-316-06-A-3	296
N-150-1-316-06-A-2	297
C-20-1-316-06-B-2	298
C-300-1-316-06-B-3	299

C-750-1-316-06-B-1	92
C-600-6-316-06-B-2	93
N-375-1-316-06-B-2	94
C-900-1-316-06-B-2	95
C-225-6-316-06-A-2	96
C-150-1-316-06-B-4	97
C-525-1-316-06-B-2	98
N-600-6-316-06-A-2	99
C-150-6-316-06-B-2	100
N-375-1-316-06-A-1	101
C-300-6-316-06-A-2	102
N-900-1-316-06-A-1	103
C-300-1-316-06-A-3	104
N-750-6-316-06-A-1	105
N-415-1-316-06-A-2	106
C-150-6-316-06-A-2	107
C-225-1-316-06-B-1	108
N-340-1-316-06-B-1	109
C-225-1-316-06-A-2	110
C-340-6-316-06-A-2	111
C-900-1-316-06-A-2	112
C-900-6-316-06-B-1	113
N-600-6-316-06-A-3	114
C-1050-1-316-06-B-2	115
N-150-6-316-06-B-4	116
C-20-6-316-06-B-2	117
C-20-6-316-06-A-2	118
C-415-1-316-06-A-2	119
N-375-6-316-06-A-1	120
N-20-6-316-06-B-1	121
C-225-6-316-06-B-1	122
N-225-1-316-06-B-2	123
C-340-1-316-06-A-1	124
N-600-1-316-06-B-2	125
N-600-6-316-06-B-1	126
C-375-6-316-06-A-1	127
C-1050-6-316-06-A-1	128
N-225-6-316-06-A-2	129
N-525-1-316-06-A-3	130
C-340-6-316-06-A-3	131
N-750-6-316-06-A-2	132
N-1050-6-316-06-A-3	133

N-415-1-316-06-A-4	300
C-415-1-316-06-B-4	301
C-415-6-316-06-B-4	302
N-1050-1-316-06-B-2	303
N-20-1-316-06-A-2	304
N-300-6-316-06-A-3	305
N-150-1-316-06-B-3	306
N-750-1-316-06-A-4	307
N-150-1-316-06-B-4	308
C-375-6-316-06-A-3	309
C-150-6-316-06-B-4	310
C-20-6-316-06-B-4	311
N-525-6-316-06-A-2	312
N-300-1-316-06-B-3	313
C-225-6-316-06-A-4	314
N-300-6-316-06-A-4	315
C-525-6-316-06-A-4	316
N-900-6-316-06-B-3	317
N-600-1-316-06-A-2	318
C-20-1-316-06-B-3	319
N-340-6-316-06-A-4	320
N-225-6-316-06-B-3	321
C-450-6-316-06-A-4	322
N-20-6-316-06-B-3	323
N-20-1-316-06-A-3	324
N-300-6-316-06-B-3	325
N-20-6-316-06-B-4	326
N-1050-6-316-06-B-4	327
N-450-6-316-06-A-4	328
N-340-6-316-06-B-4	329
C-375-6-316-06-A-4	330
C-20-1-316-06-B-4	331
N-375-1-316-06-A-3	332
N-300-6-316-06-B-4	333
N-150-6-316-06-A-4	334
C-225-1-316-06-B-4	335
C-450-1-316-06-A-3	336
C-600-1-316-06-B-3	337
N-375-6-316-06-A-2	338
N-1050-1-316-06-A-3	339
N-525-6-316-06-B-4	340
C-1050-1-316-06-A-3	341



N-375-1-316-06-B-3	134
C-750-1-316-06-B-2	135
C-225-1-316-06-A-3	136
C-225-1-316-06-A-4	137
C-600-1-316-06-A-2	138
C-415-6-316-06-A-3	139
C-415-6-316-06-B-2	140
C-525-6-316-06-A-3	141
C-600-1-316-06-A-3	142
C-750-1-316-06-B-3	143
N-900-1-316-06-A-2	144
C-300-6-316-06-B-3	145
N-415-1-316-06-B-1	146
C-1050-6-316-06-A-2	147
N-20-1-316-06-A-1	148
N-415-1-316-06-B-2	149
C-375-6-316-06-A-2	150
C-900-6-316-06-B-2	151
N-340-6-316-06-A-2	152
N-415-6-316-06-B-2	153
C-750-6-316-06-A-1	154
C-525-1-316-06-B-3	155
C-525-1-316-06-B-4	156
C-525-1-316-06-A-2	157
C-225-1-316-06-B-2	158
C-375-1-316-06-B-2	159
C-450-6-316-06-A-2	160
C-150-6-316-06-A-3	161
N-1050-1-316-06-A-1	162
C-1050-1-316-06-B-3	163
N-225-1-316-06-A-1	164
N-600-6-316-06-A-4	165
N-225-6-316-06-A-3	166
C-600-6-316-06-A-1	167
N-450-1-316-06-B-2	168
N-225-6-316-06-B-1	169
C-600-1-316-06-B-1	170
C-300-1-316-06-B-2	171
C-375-1-316-06-A-1	172
N-415-1-316-06-B-3	173
N-900-6-316-06-B-1	174
C-450-6-316-06-B-2	175

C-375-6-316-06-B-4	342
N-900-6-316-06-B-4	343
N-450-1-316-06-B-4	344
C-150-6-316-06-A-4	345
N-415-6-316-06-B-3	346
C-750-6-316-06-A-4	347
N-375-6-316-06-A-3	348
C-900-1-316-06-A-4	349
N-600-1-316-06-A-3	350
C-900-6-316-06-A-4	351
N-375-6-316-06-B-2	352
N-340-1-316-06-B-3	353
C-300-6-316-06-A-3	354
C-20-1-316-06-A-4	355
C-525-1-316-06-A-4	356
N-1050-1-316-06-A-4	357
N-375-1-316-06-A-4	358
N-20-1-316-06-A-4	359
N-375-6-316-06-A-4	360
N-900-1-316-06-B-4	361
C-900-6-316-06-B-3	362
C-300-6-316-06-A-4	363
N-900-6-316-06-A-2	364
C-450-1-316-06-B-2	365
N-150-1-316-06-A-3	366
N-340-1-316-06-A-3	367
N-450-6-316-06-B-3	368
C-300-1-316-06-B-4	369
N-525-6-316-06-A-3	370
N-750-6-316-06-B-3	371
N-600-1-316-06-A-4	372
N-300-1-316-06-A-3	373
N-1050-1-316-06-B-3	374
C-340-1-316-06-B-3	375
N-525-1-316-06-B-2	376
N-300-6-316-06-A-1	377
N-340-1-316-06-A-4	378
C-1050-6-316-06-B-3	379
C-1050-6-316-06-B-4	380
N-525-6-316-06-A-4	381
C-1050-6-316-06-A-4	382
C-375-1-316-06-B-4	383

C-600-6-316-06-A-2	176	C-340-1-316-06-B-4	384
N-225-1-316-06-A-2	177	N-900-6-316-06-A-3	385
N-450-1-316-06-A-2	178	C-300-6-316-06-B-4	386
C-600-6-316-06-A-3	179	C-225-6-316-06-B-3	387
N-600-6-316-06-B-2	180	N-450-6-316-06-B-4	388
N-900-1-316-06-A-3	181	C-450-6-316-06-B-4	389
C-415-6-316-06-B-3	182	C-340-1-316-06-A-4	390
C-525-6-316-06-B-2	183	N-300-1-316-06-A-4	391
C-900-1-316-06-B-3	184	N-900-6-316-06-A-4	392
N-750-1-316-06-B-3	185	N-375-6-316-06-B-3	393
N-600-1-316-06-B-3	186	C-450-1-316-06-B-3	394
N-150-6-316-06-A-2	187	N-225-6-316-06-B-4	395
C-20-1-316-06-A-2	188	N-750-6-316-06-B-4	396
N-525-1-316-06-A-4	189	N-375-6-316-06-B-4	397
N-300-1-316-06-A-2	190	N-525-1-316-06-B-3	398
C-525-6-316-06-B-3	191	N-450-1-316-06-A-4	399
C-600-6-316-06-A-4	192	C-600-1-316-06-B-4	400
N-340-6-316-06-B-2	193	N-300-6-316-06-A-2	401
N-20-6-316-06-B-2	194	C-750-1-316-06-A-4	402
N-20-6-316-06-A-3	195	C-450-1-316-06-B-4	403
N-600-6-316-06-B-3	196	N-525-1-316-06-B-4	404
N-525-1-316-06-B-1	197	N-300-1-316-06-B-4	405
N-450-1-316-06-A-3	198	N-340-1-316-06-B-4	406
C-450-1-316-06-A-2	199	C-150-1-316-06-A-4	407
N-525-6-316-06-B-2	200	C-600-6-316-06-B-4	408
C-340-1-316-06-B-2	201	C-900-1-316-06-B-4	409
C-900-1-316-06-A-3	202	C-225-6-316-06-B-4	410
N-750-1-316-06-B-4	203	N-415-6-316-06-B-4	411
C-900-6-316-06-A-1	204	N-1050-1-316-06-B-4	412
N-20-1-316-06-B-3	205	C-450-1-316-06-A-4	413
N-750-6-316-06-B-1	206	C-900-6-316-06-B-4	414
N-340-6-316-06-A-3	207	C-1050-1-316-06-A-4	415
N-525-6-316-06-B-3	208	N-150-1-316-06-A-4	416

*Tabella 4.4 – Sequenza di scatto.*

Al termine della sequenza le fotografie sono state salvate in due formati differenti: il primo è il formato RAW che consiste in un particolare metodo di memorizzazione dei dati descrittivi di un'immagine. Questa tecnica viene usata per non avere perdite di qualità della registrazione su un qualsiasi supporto di memoria, rispetto ai segnali catturati dal sensore e successivamente composti per interpolazione dal processore d'immagine della fotocamera nelle sue tre componenti fondamentali RGB (Red, Green, Blue); il secondo, invece, è il formato PNG (acronimo di Portable Network Graphics) che sostanzialmente è molto simile al

formato GIF: permette di memorizzare delle immagini utilizzando una scala di 256 colori. La caratteristica principale di questo formato consiste nella compressione dell'immagine senza perdita di informazioni.

All'interno del software Camera RAW ad ogni fotografia è stata applicata la taratura effettuata con il ColorChecker Passport in modo da avere gli stessi parametri di bilanciamento bianco, esposizione, luminosità, temperatura colore, ecc. prima di salvare il file anche in formato PNG. Quest'ultimo formato è necessario per l'analisi degli istogrammi RGB in quanto tutte le foto sono state analizzate con il programma creato in Matlab appositamente per questo lavoro. Questo programma riceve come input una fotografia in formato PNG e, per ogni pixel della fotografia, legge e memorizza i valori di media e deviazione standard dei tre canali del rosso, del verde e del blu. Finito di scansionare tutta l'immagine il programma genera gli istogrammi delle occorrenze su una scala che parte da zero e arriva fino a 255 (avendo così  $2^8$  bit ossia 256 possibili valori del colore). Il programma restituisce gli istogrammi dei tre canali di rosso, verde e blu in cui compare la media e la deviazione standard per ogni canale.

Di seguito riporto, per ogni campione, le immagini delle quattro repliche con i relativi istogrammi:

# C-20-1-316-06-A:

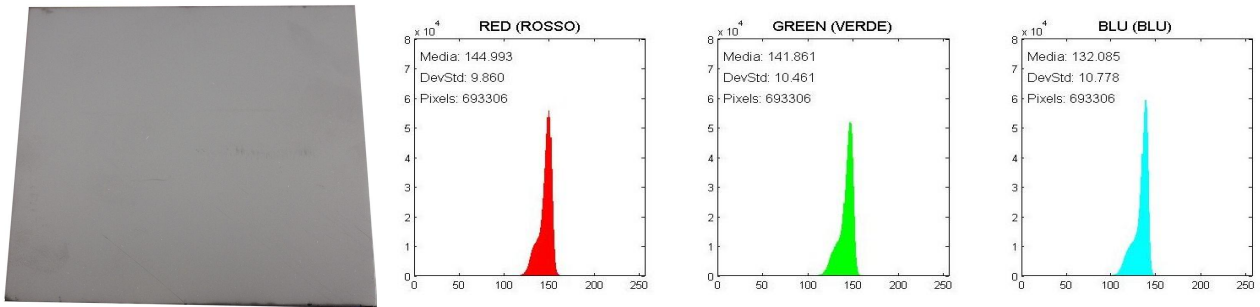


Fig. 4.6 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 1).

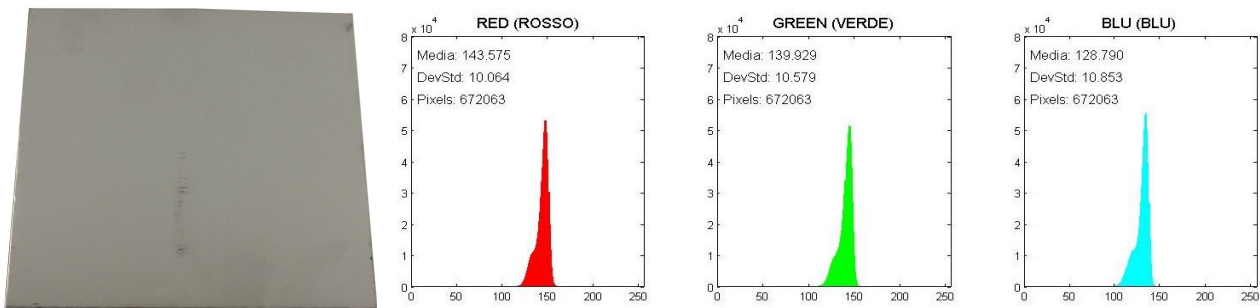


Fig. 4.7 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 2).

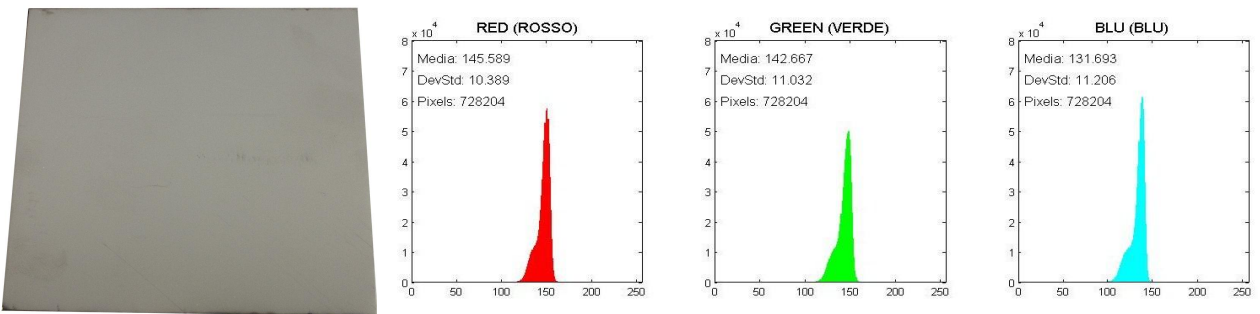


Fig. 4.8 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 3).

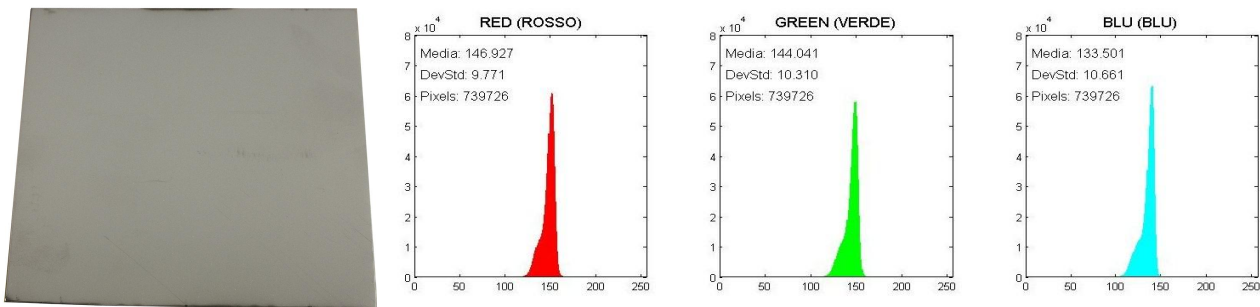


Fig. 4.9 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-A (campione 4).

# C-20-1-316-06-B:

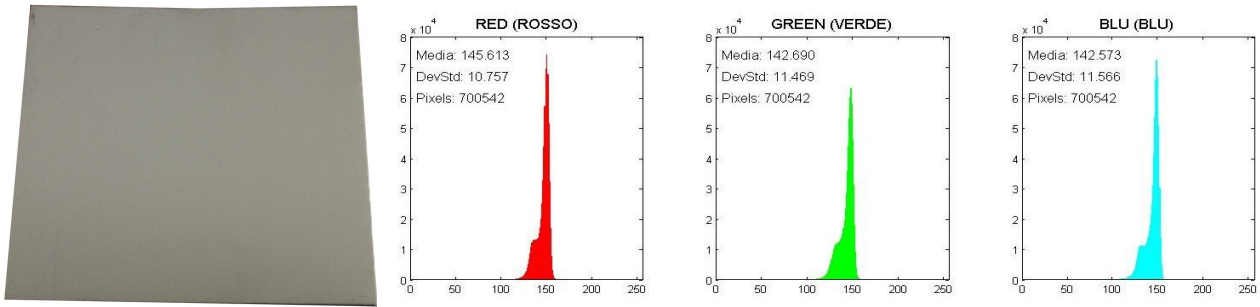


Fig. 4.10 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 1).

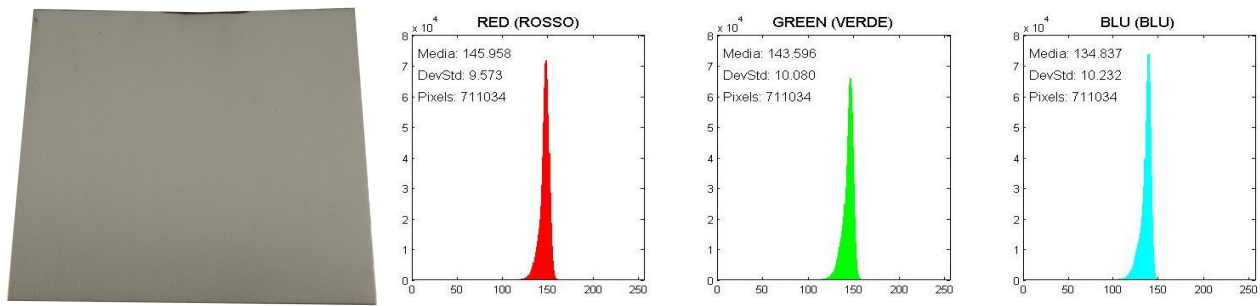


Fig. 4.11 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 2).

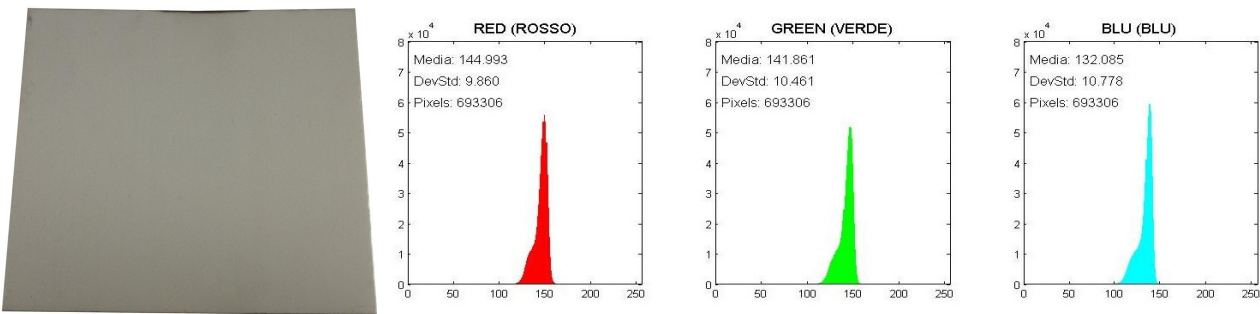


Fig. 4.12 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 3).

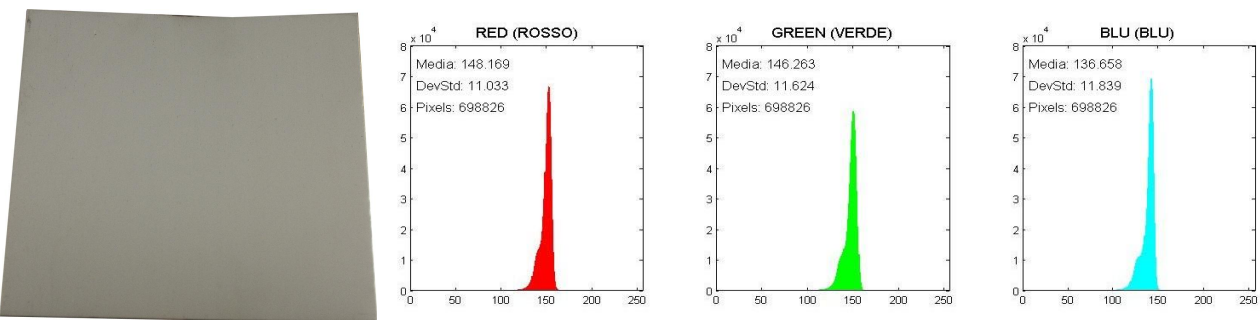


Fig. 4.13 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-1-316-06-B (campione 4).

# C-20-6-316-06-A:

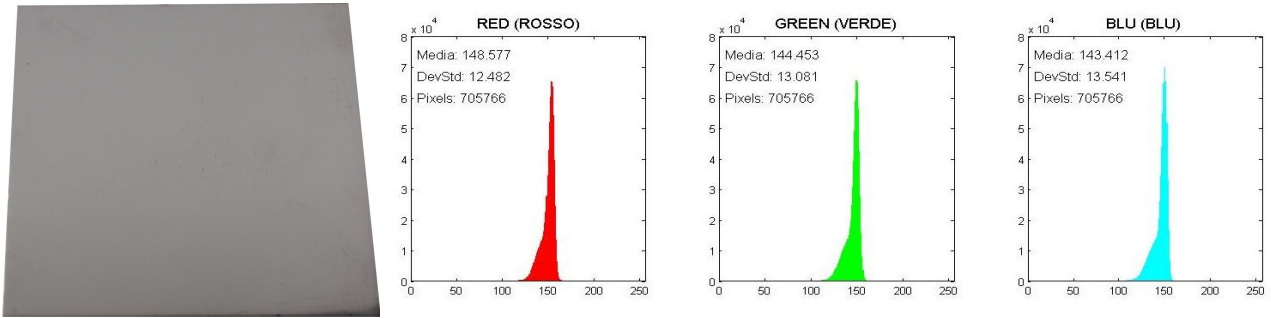


Fig. 4.14 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 1).

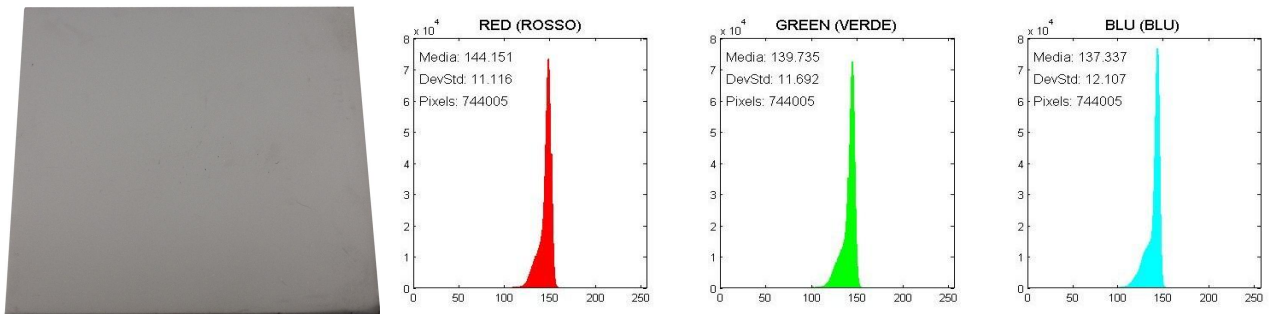


Fig. 4.15 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 2).

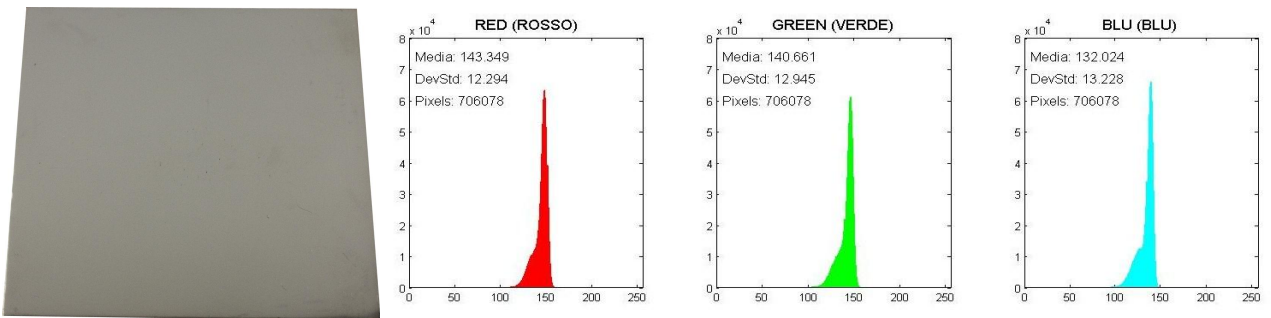


Fig. 4.16 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 3).

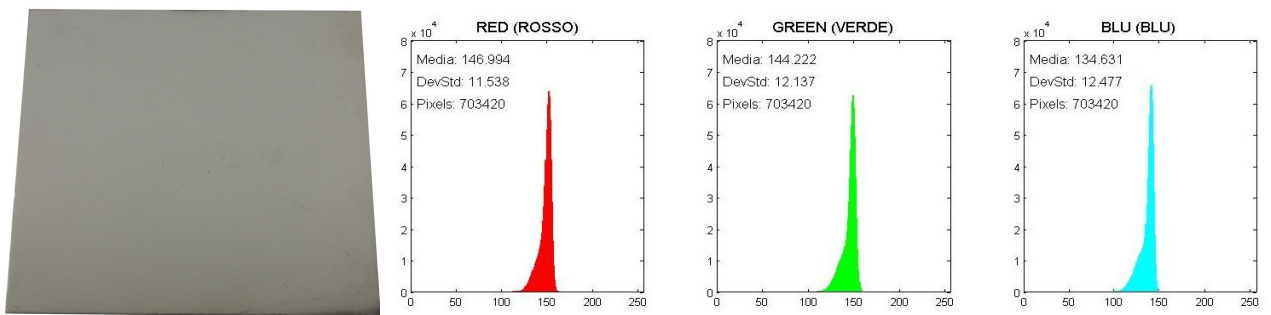


Fig. 4.17 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-A (campione 4).

## C-20-6-316-06-B:

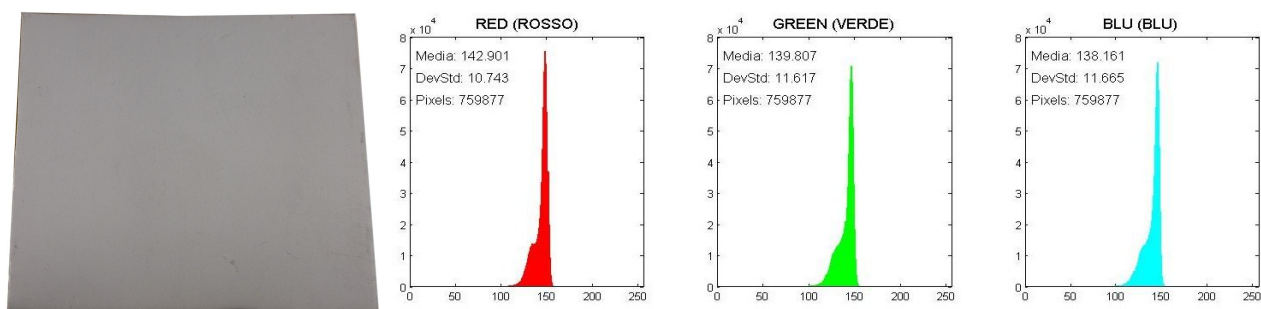


Fig. 4.18 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 1).

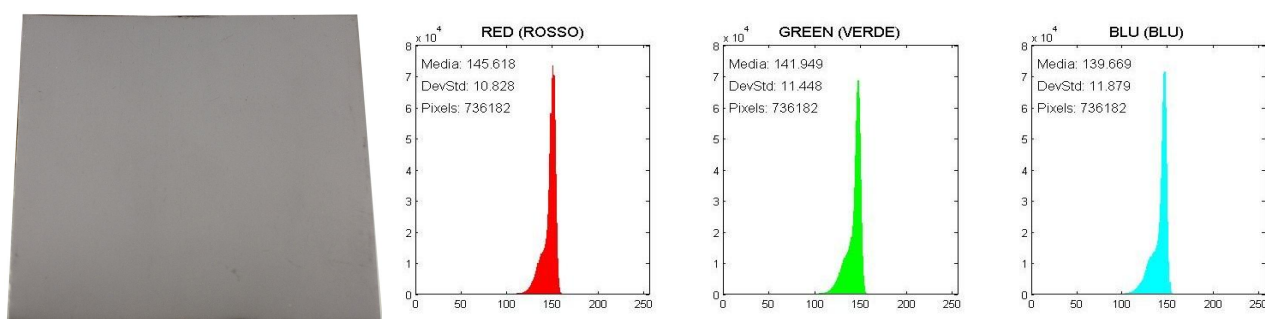


Fig. 4.19 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 2).

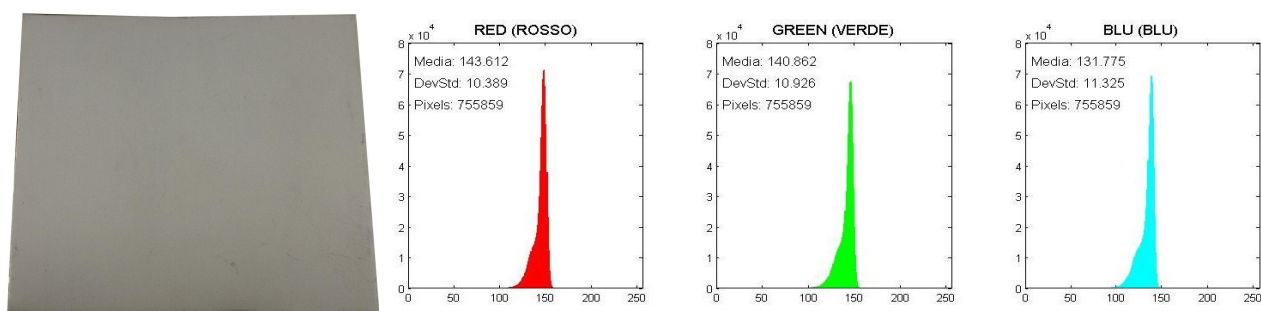


Fig. 4.20 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 3).

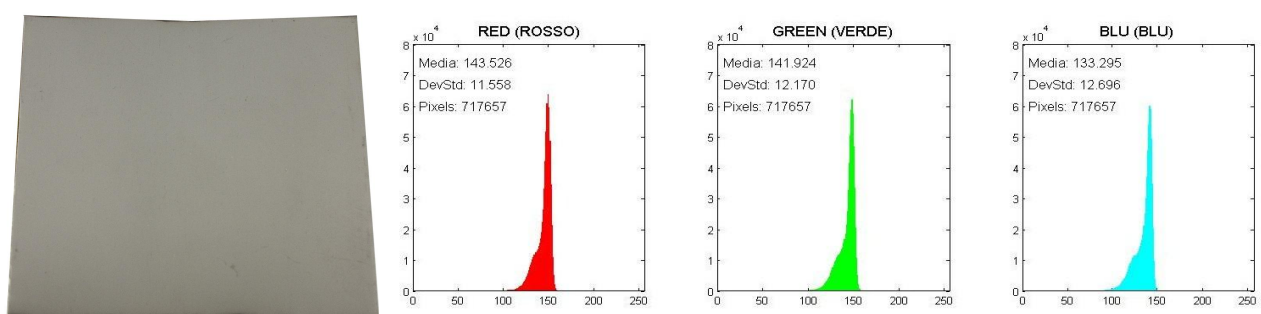


Fig. 4.21 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-20-6-316-06-B (campione 4).

# N-20-1-316-06-A:

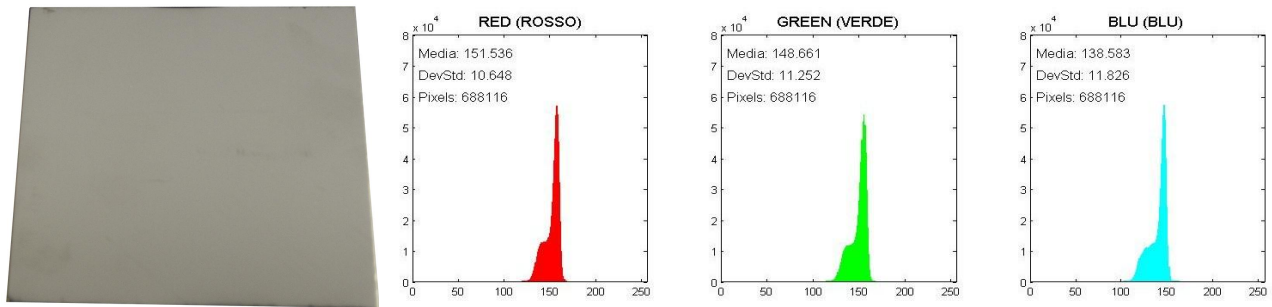


Fig. 4.22 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 1).

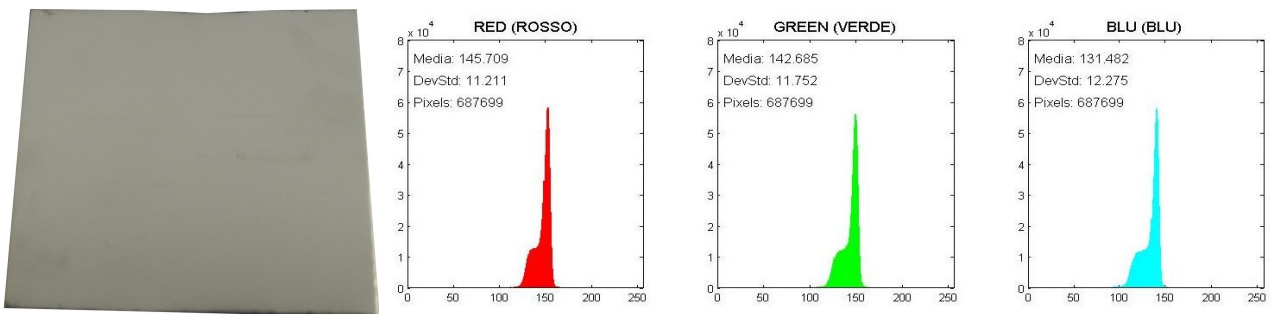


Fig. 4.23 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 2).

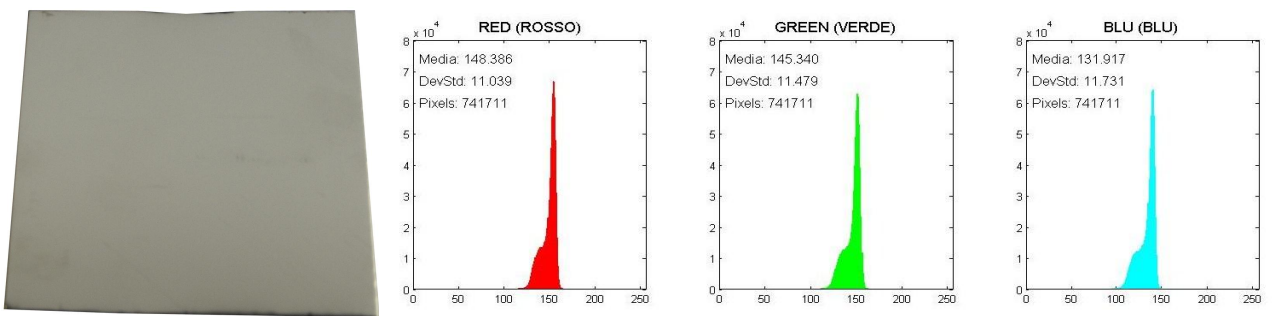


Fig. 4.24 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 3).

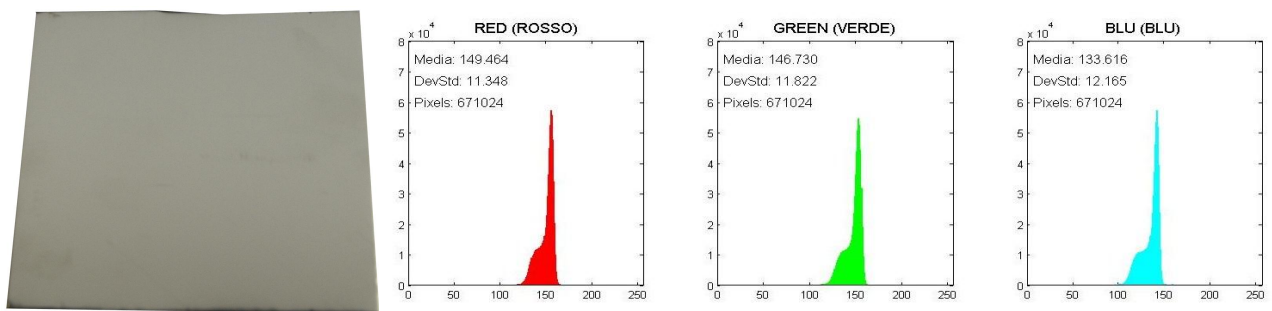


Fig. 4.25 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-A (campione 4).



# N-20-1-316-06-B:

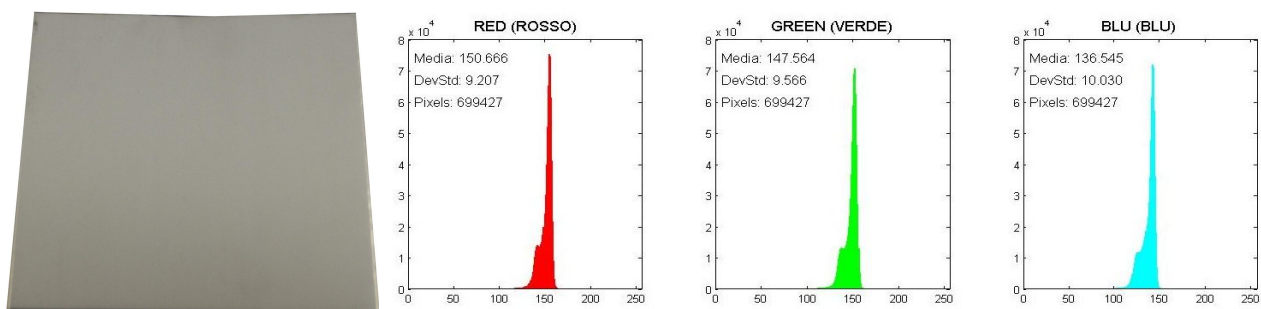


Fig. 4.26 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 1).

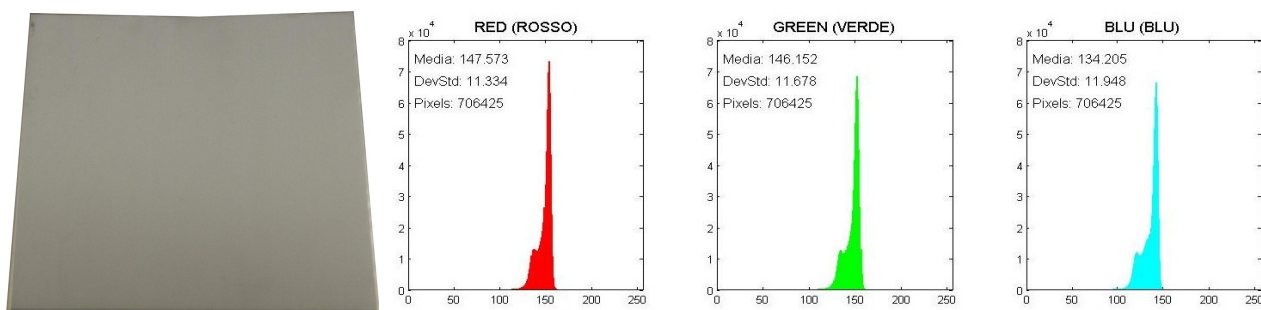


Fig. 4.27 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 2).

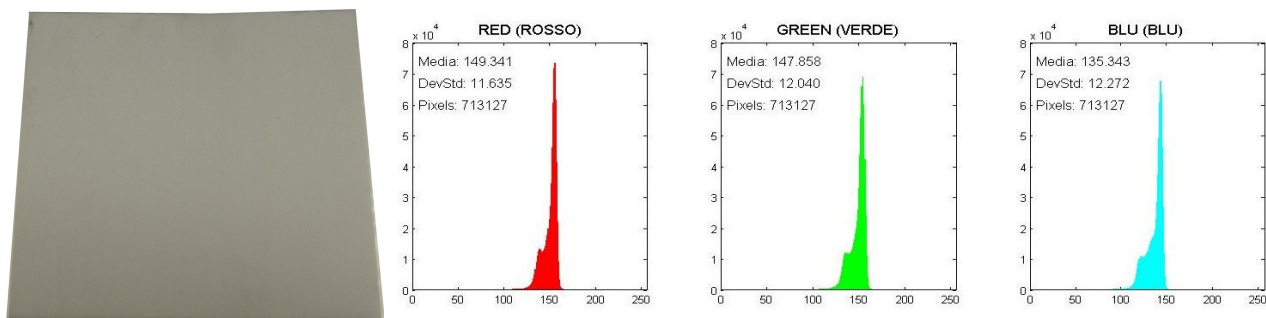


Fig. 4.28 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 3).

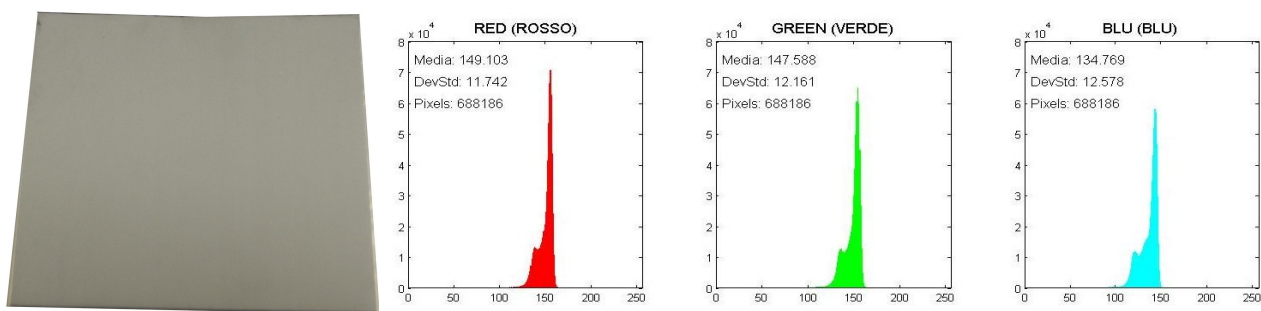


Fig. 4.29 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-1-316-06-B (campione 4).

# N-20-6-316-06-A:

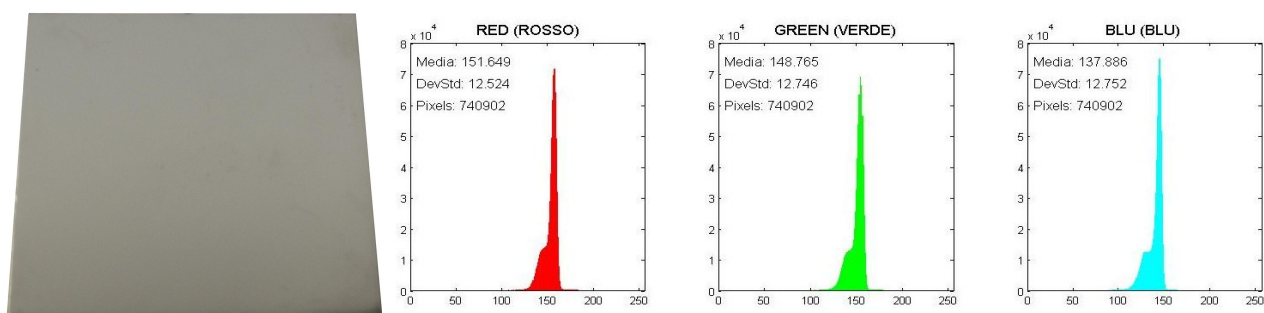


Fig. 4.30 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 1).

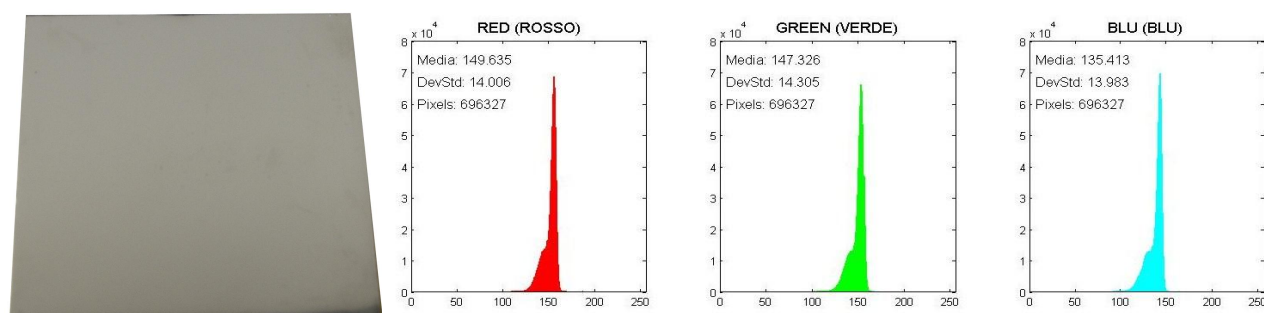


Fig. 4.31 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 2).

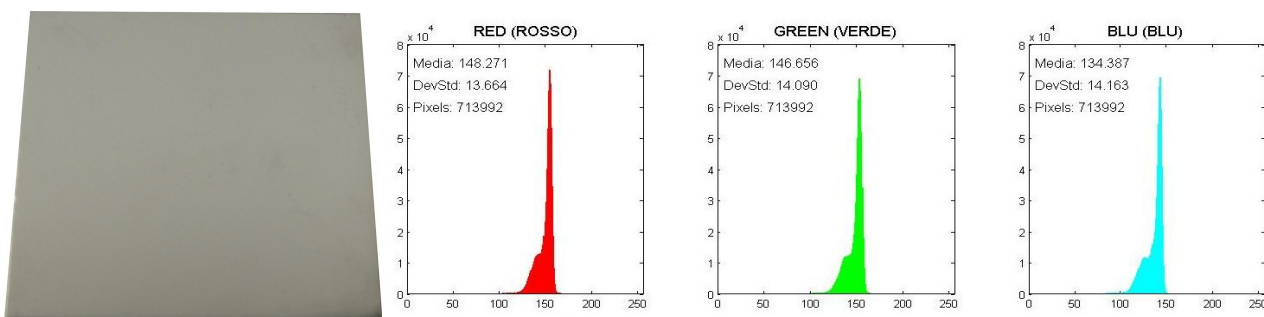


Fig. 4.32 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 3).

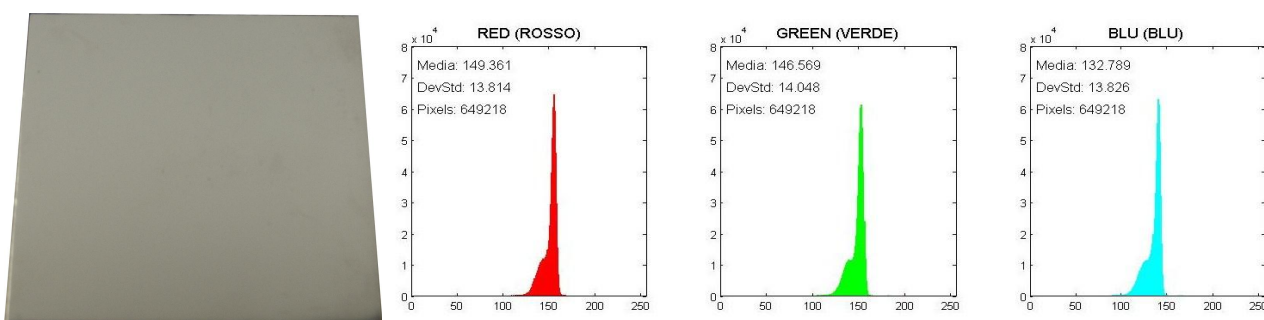


Fig. 4.33 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-A (campione 4).

# N-20-6-316-06-B:

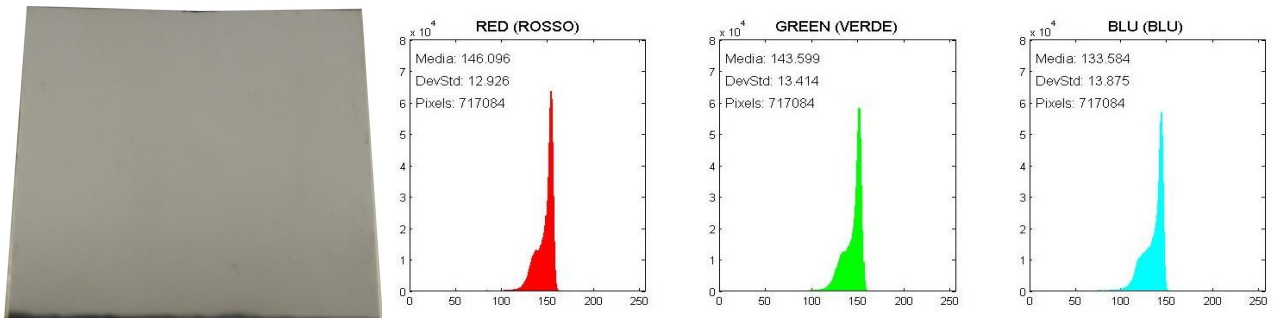


Fig. 4.34 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 1).

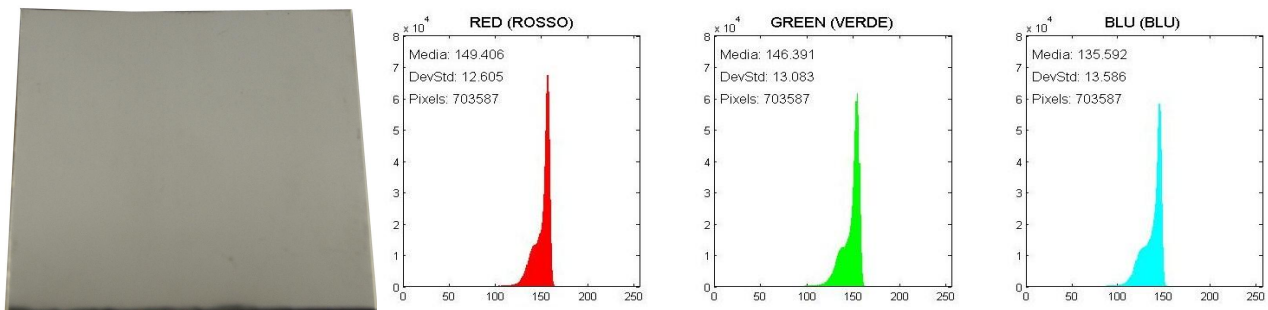


Fig. 4.35 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 2).

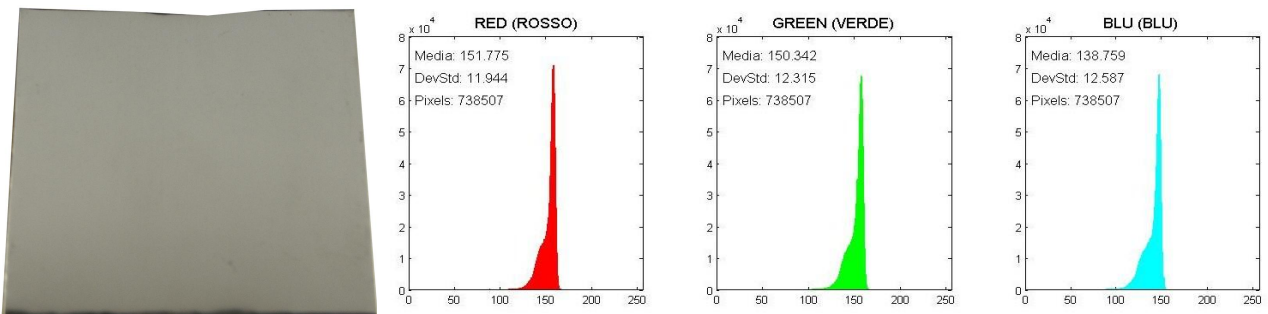


Fig. 4.36 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 3).

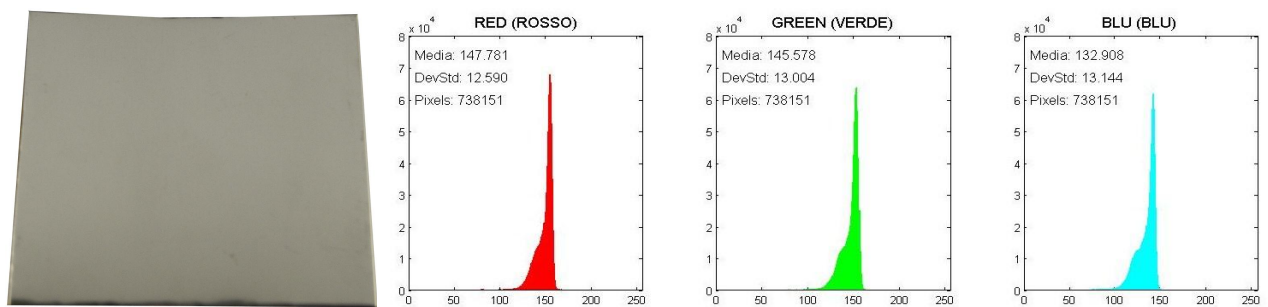


Fig. 4.37 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-20-6-316-06-B (campione 4).

# C-150-1-316-06-A:

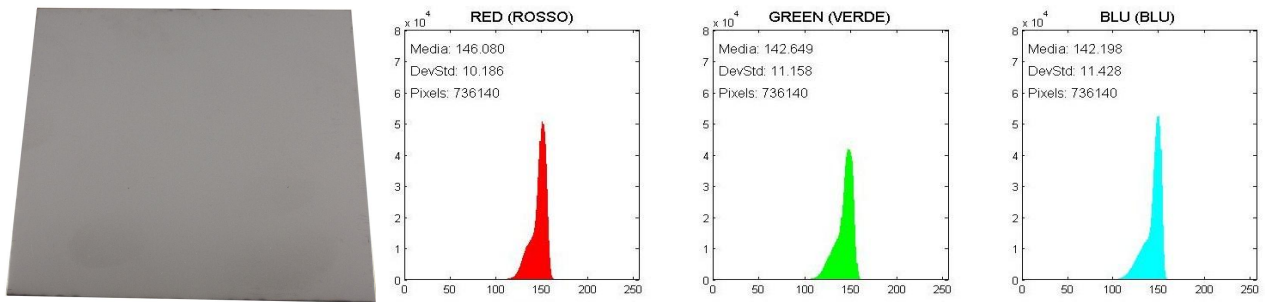


Fig. 4.38 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 1).

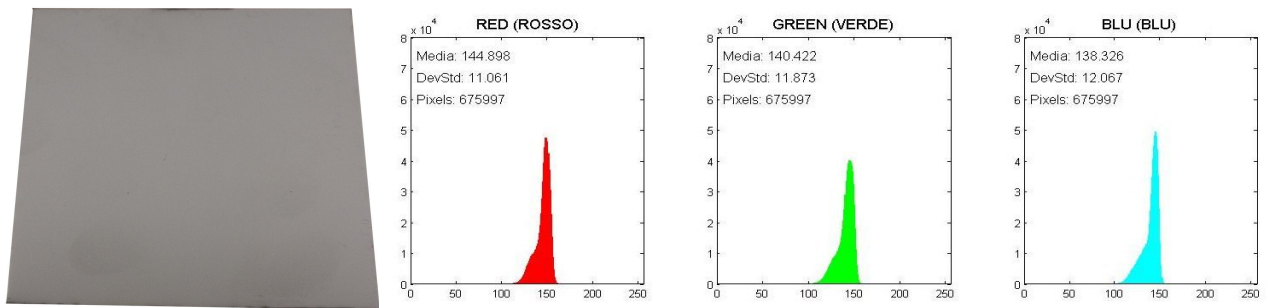


Fig. 4.39 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 2).

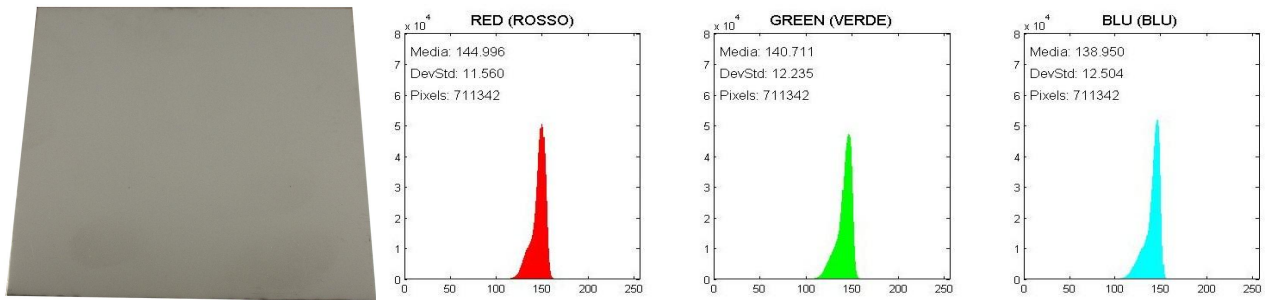


Fig. 4.40 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 3).

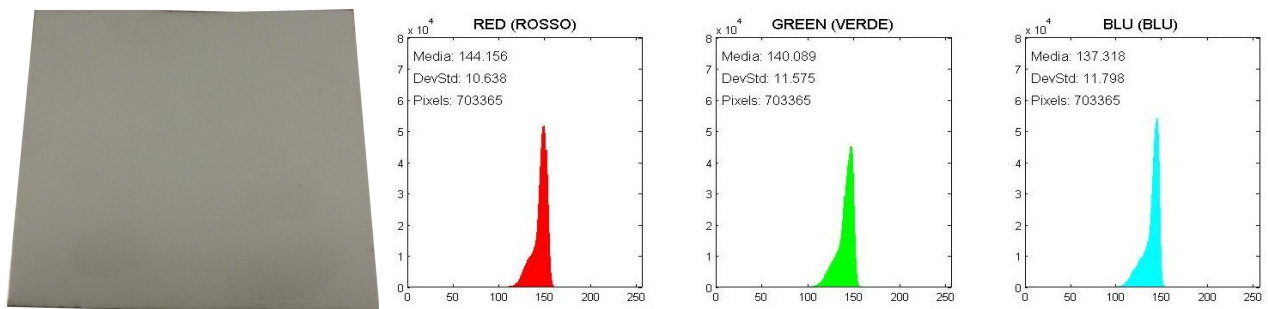


Fig. 4.41 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-A (campione 4).

## C-150-1-316-06-B:

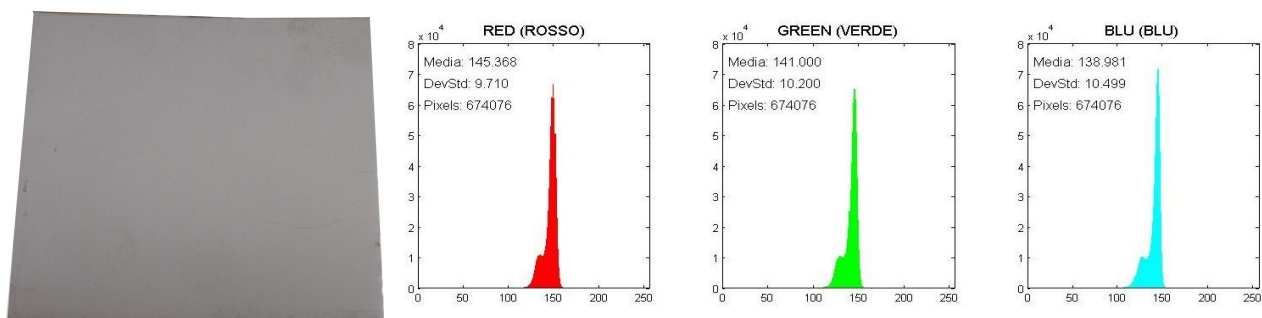


Fig. 4.42 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 1).

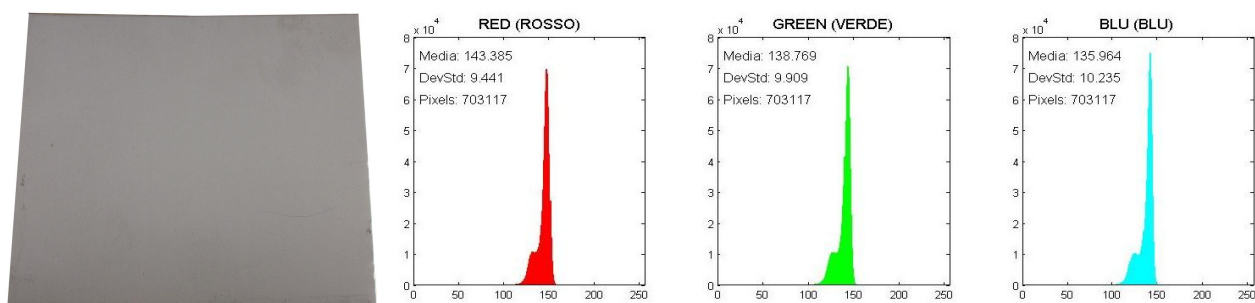


Fig. 4.43 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 2).

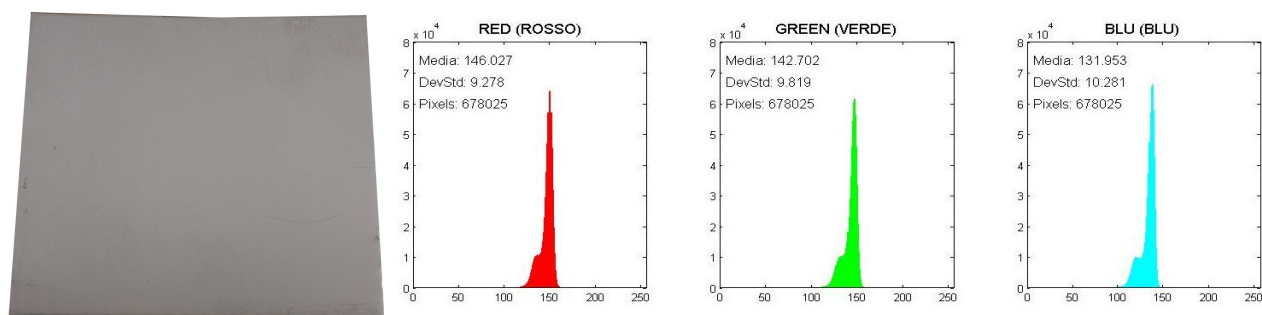


Fig. 4.44 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 3).

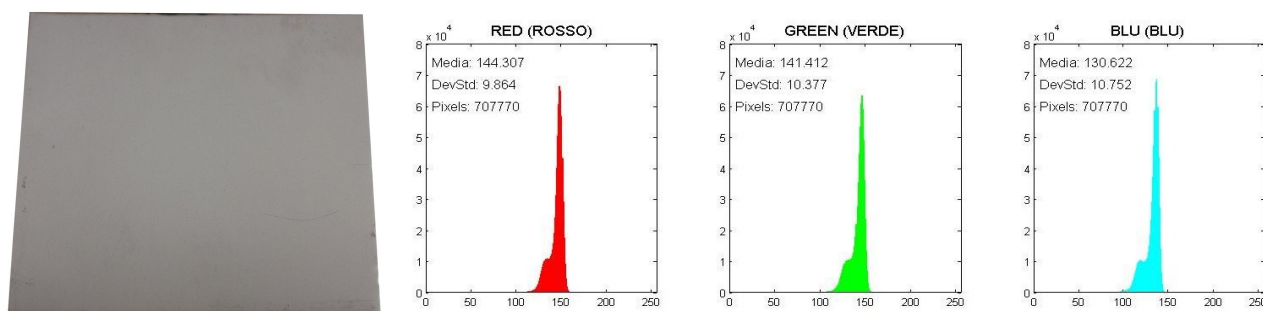


Fig. 4.45 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-1-316-06-B (campione 4).

## C-150-6-316-06-A:

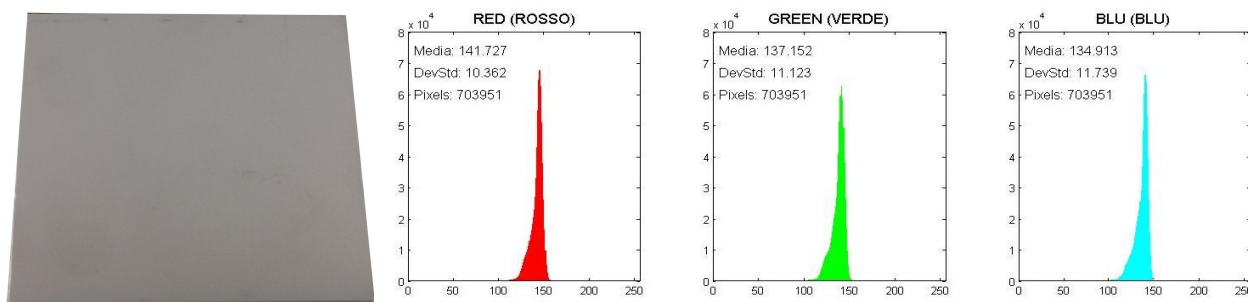


Fig. 4.46 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 1).

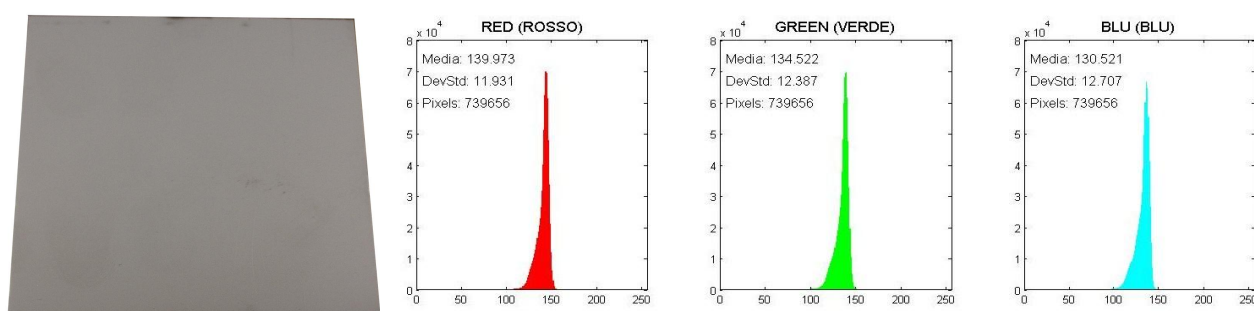


Fig. 4.47 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 2).

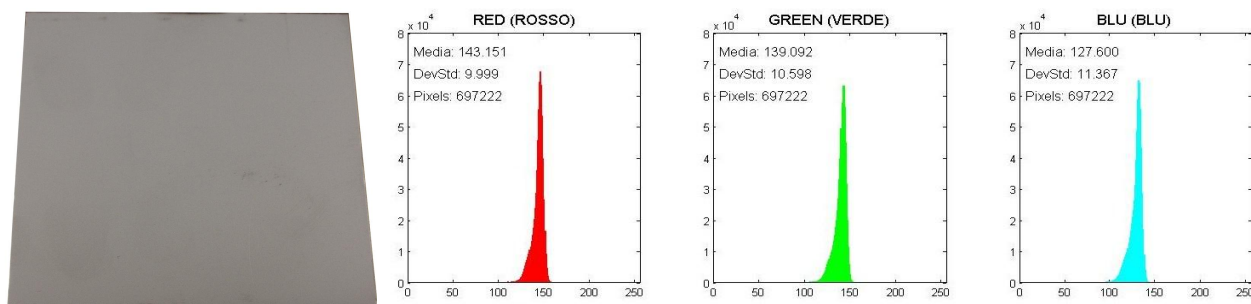


Fig. 4.48 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 3).

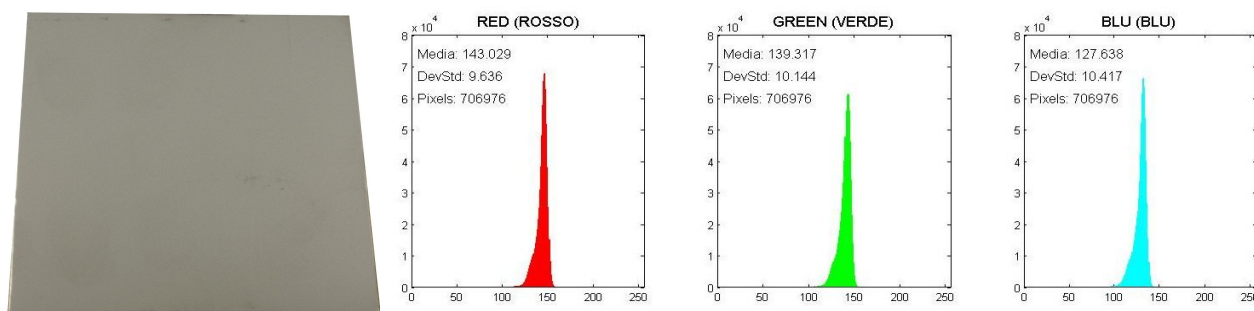


Fig. 4.49 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-A (campione 4).

## C-150-6-316-06-B:

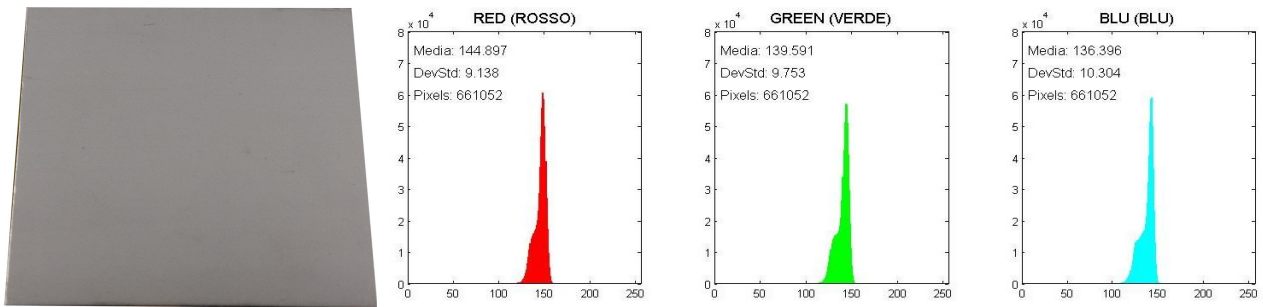


Fig. 4.50 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 1).

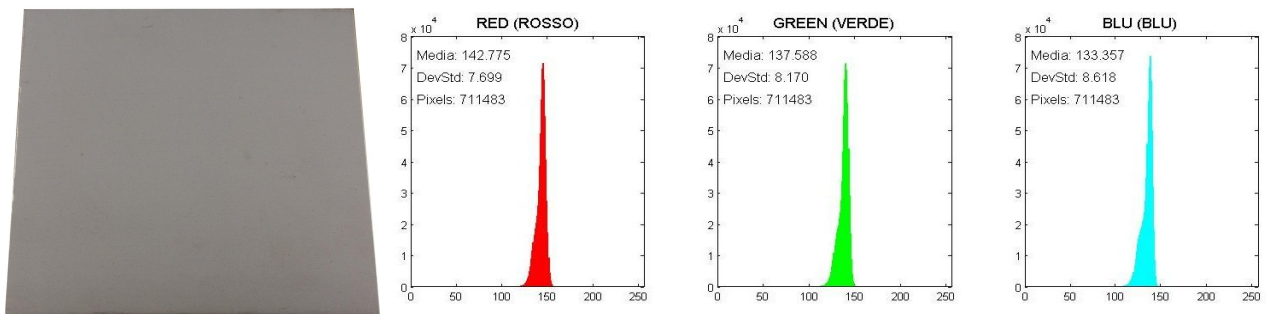


Fig. 4.51 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 2).

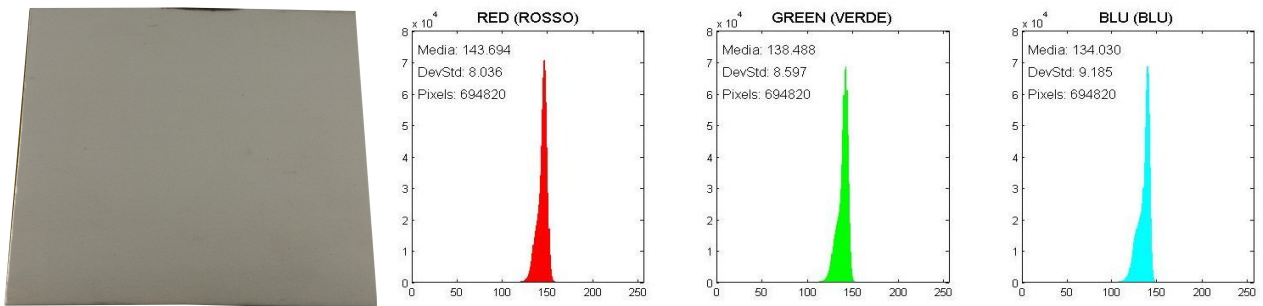


Fig. 4.52 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 3).

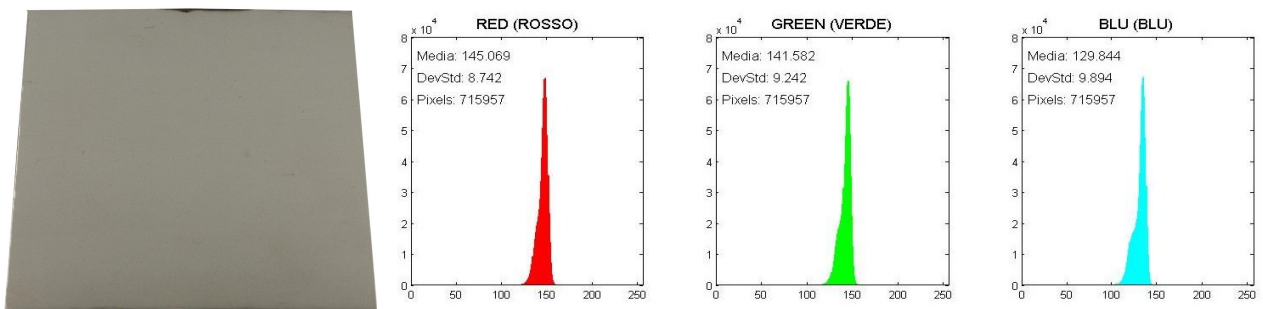


Fig. 4.53 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-150-6-316-06-B (campione 4).

# N-150-1-316-06-A:

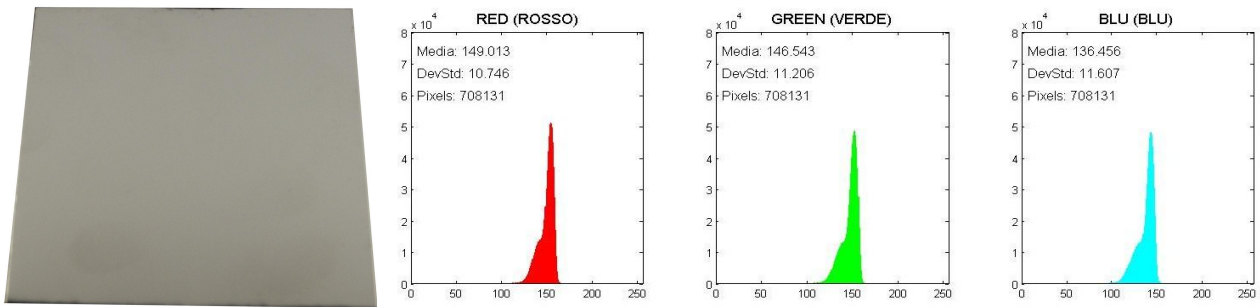


Fig. 4.54 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 1).

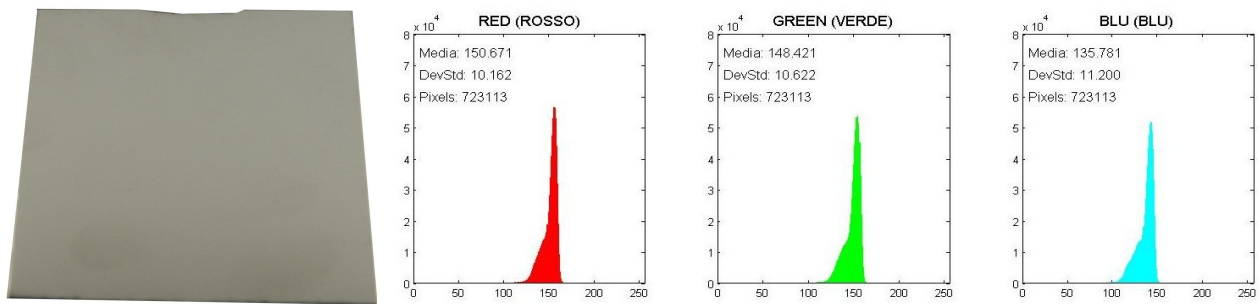


Fig. 4.55 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 2).

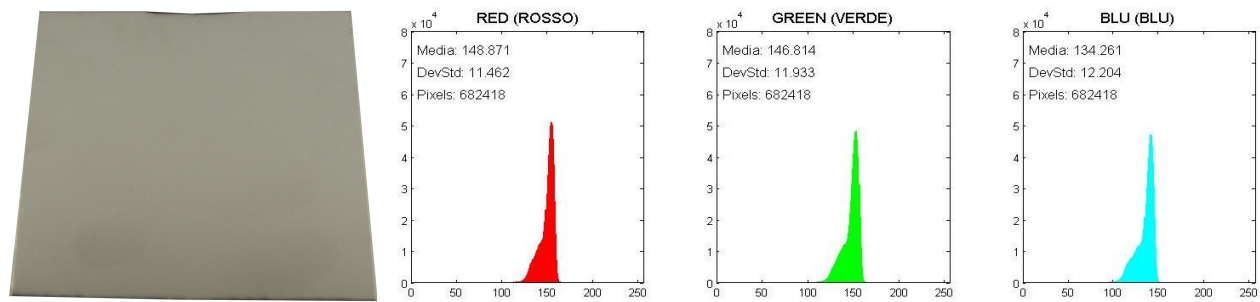


Fig. 4.56 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 3).

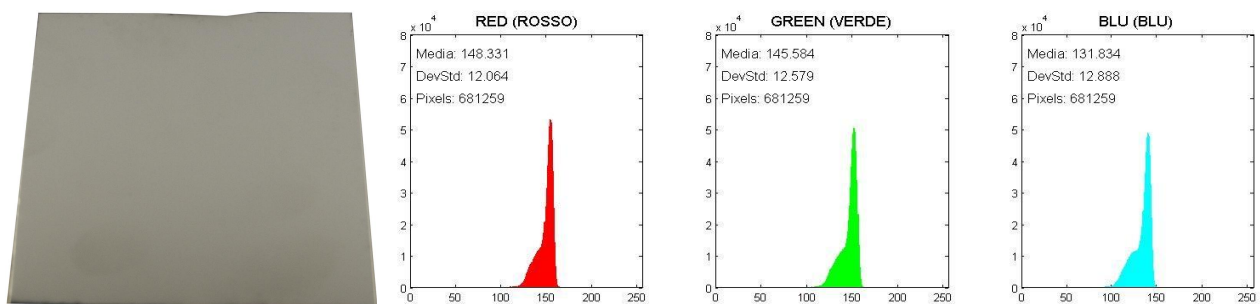


Fig. 4.57 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-A (campione 4).



# N-150-1-316-06-B:

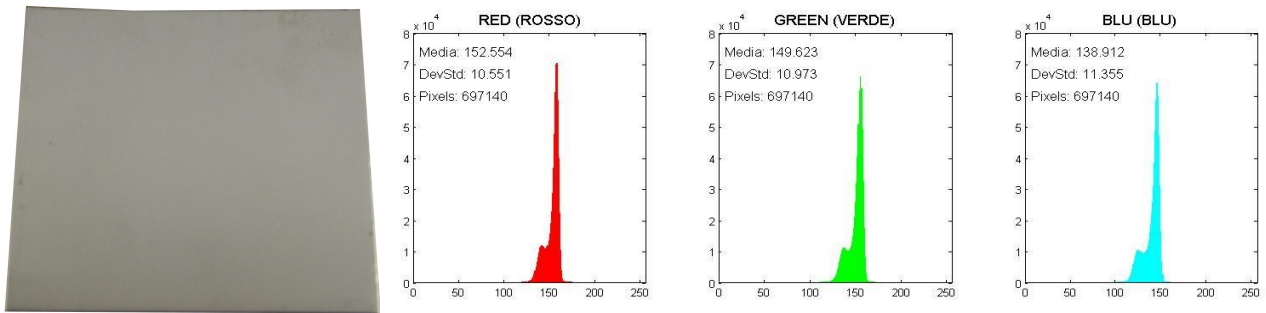


Fig. 4.58 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 1).

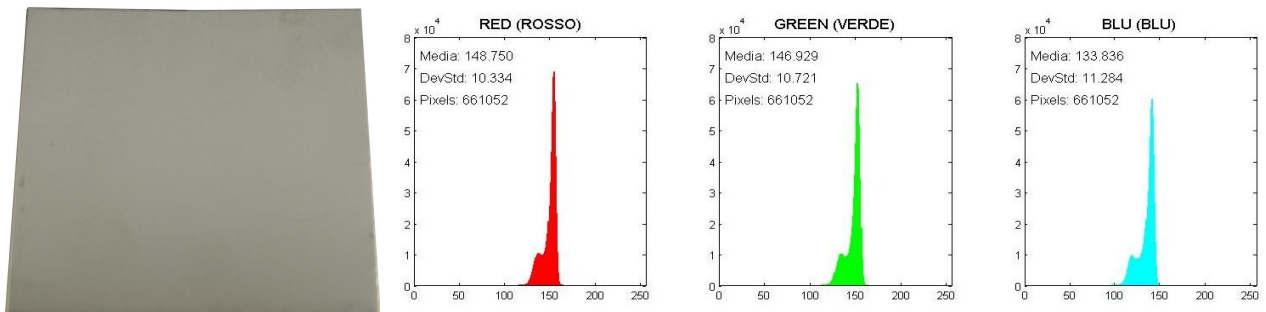


Fig. 4.59 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 2).

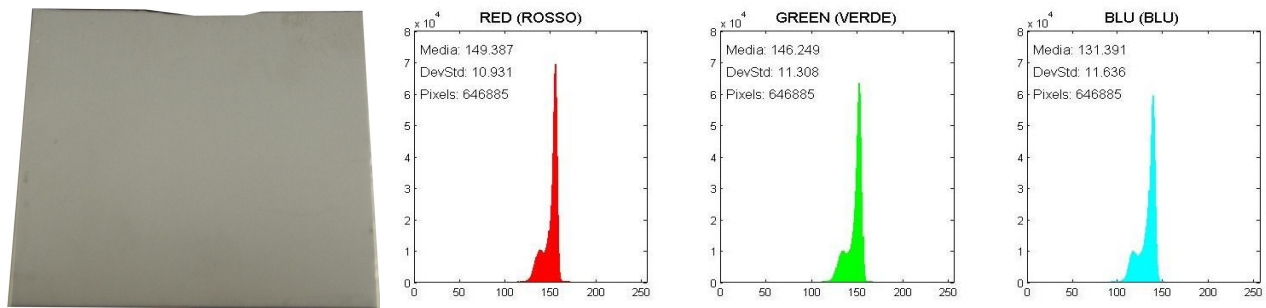


Fig. 4.60 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 3).

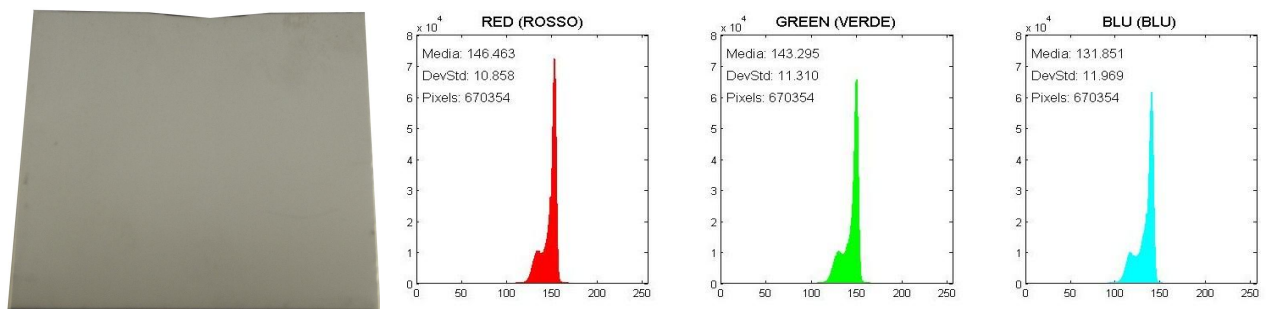


Fig. 4.61 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-1-316-06-B (campione 4).

# N-150-6-316-06-A:

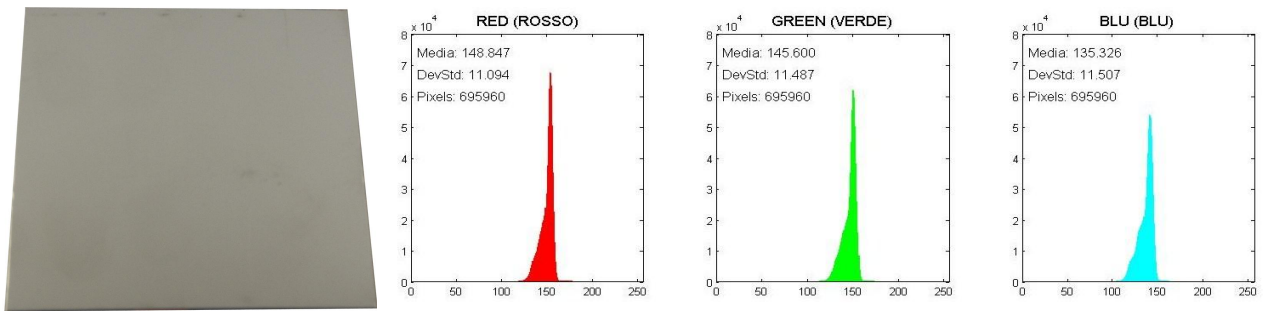


Fig. 4.62 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 1).

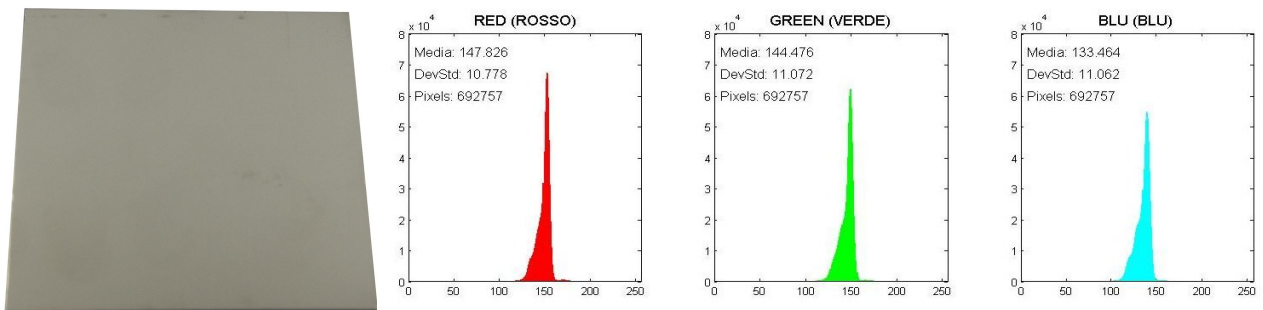


Fig. 4.63 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 2).

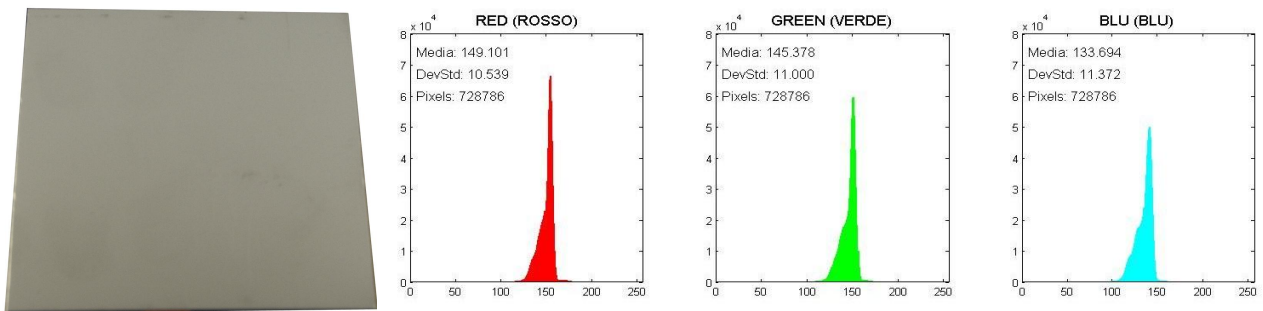


Fig. 4.64 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 3).

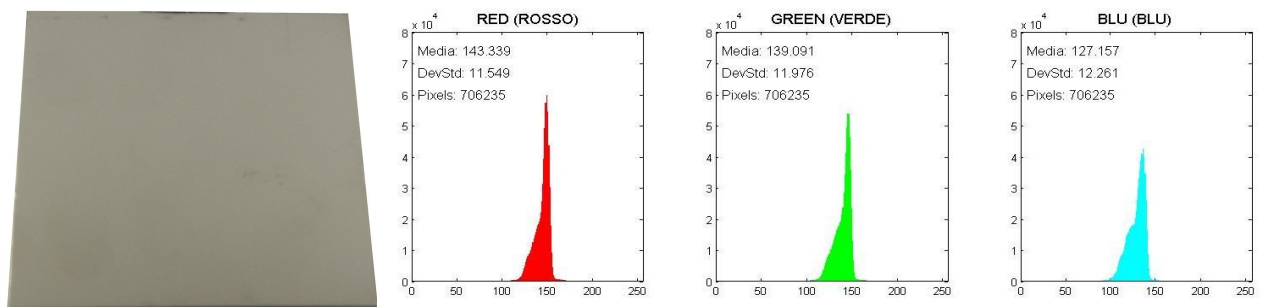


Fig. 4.65 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-A (campione 4).

# N-150-6-316-06-B:

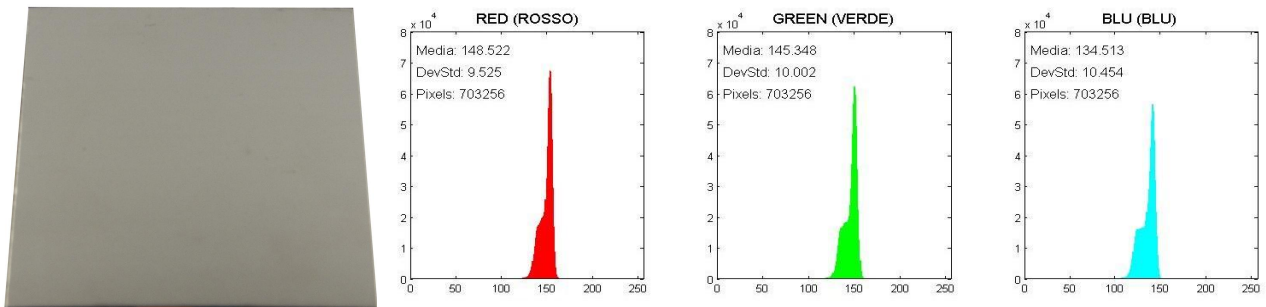


Fig. 4.66 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 1).

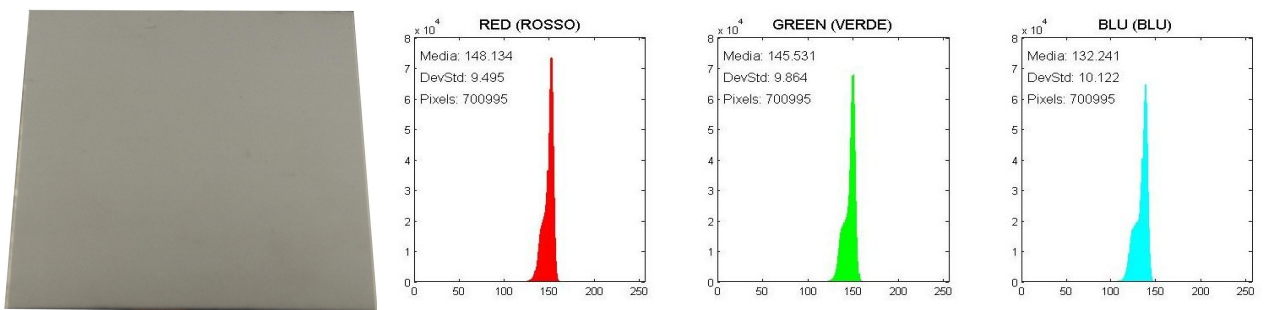


Fig. 4.67 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 2).

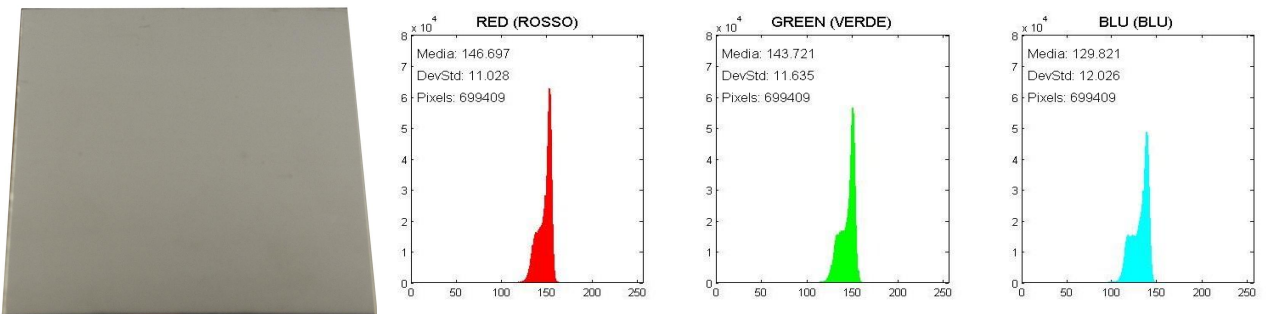


Fig. 4.68 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 3).

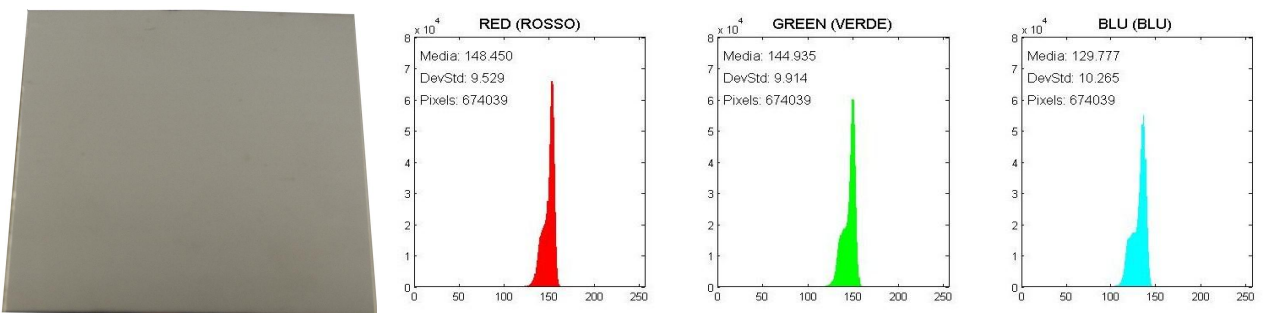


Fig. 4.69 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-150-6-316-06-B (campione 4).

# C-225-1-316-06-A:

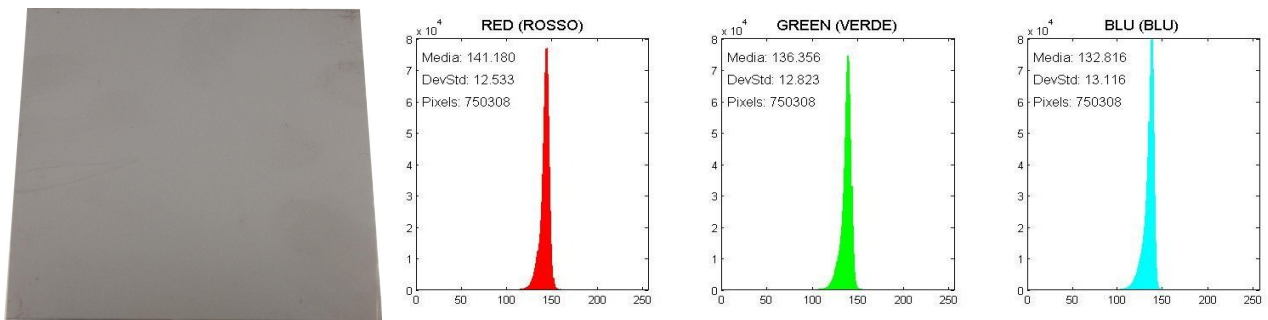


Fig. 4.70 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 1).

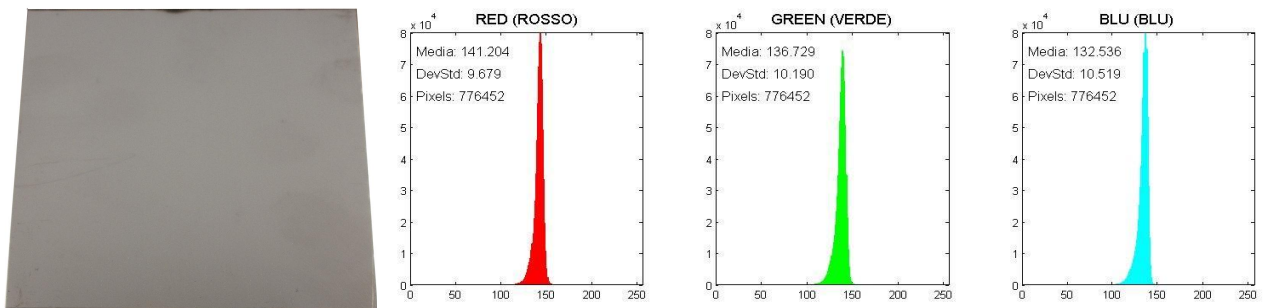


Fig. 4.71 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 2).

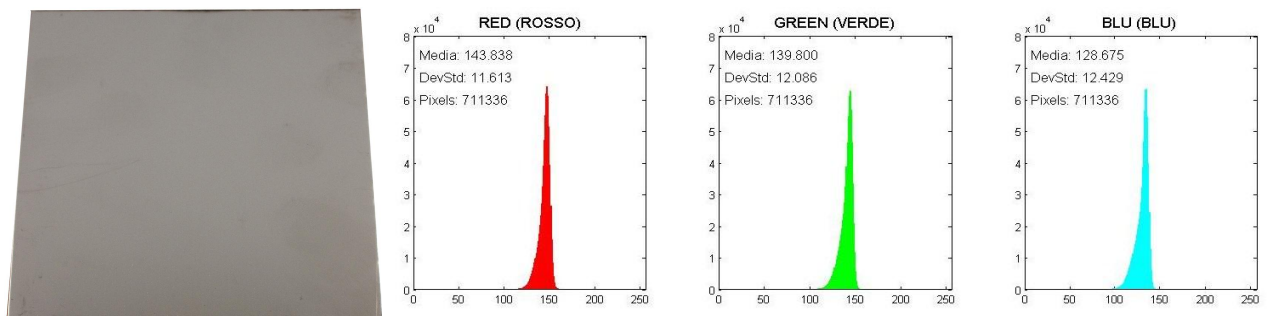


Fig. 4.72 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 3).

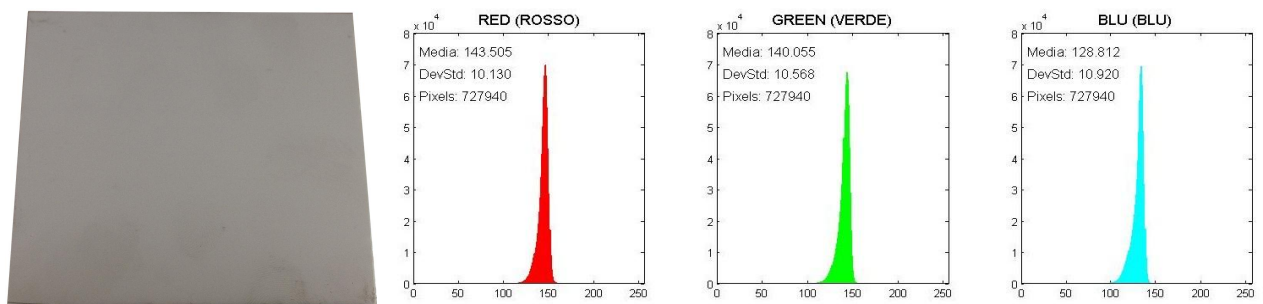


Fig. 4.73 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-A (campione 4).

## C-225-1-316-06-B:

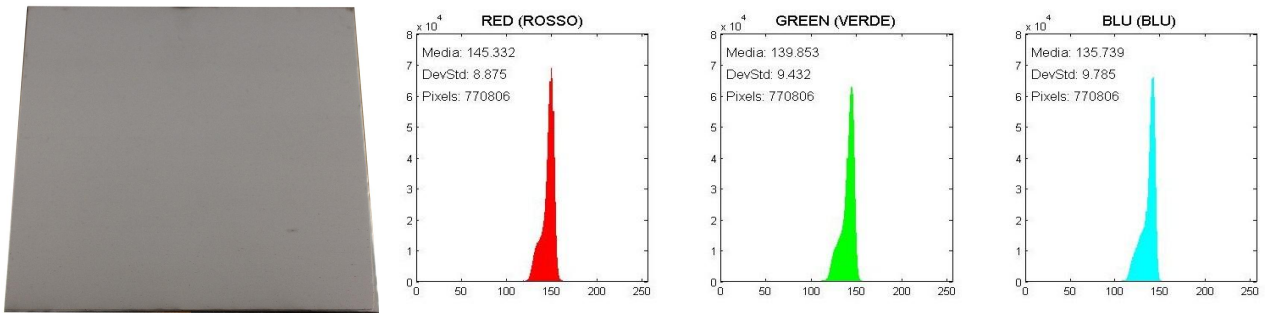


Fig. 4.74 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 1).

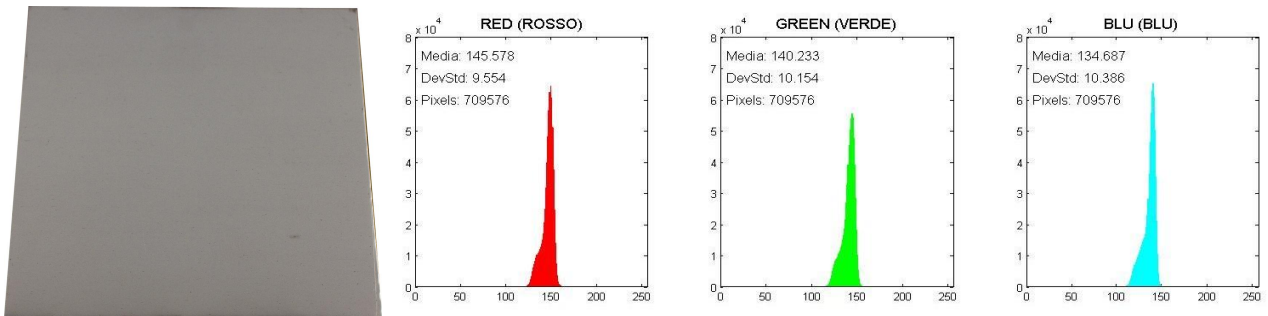


Fig. 4.75 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 2).

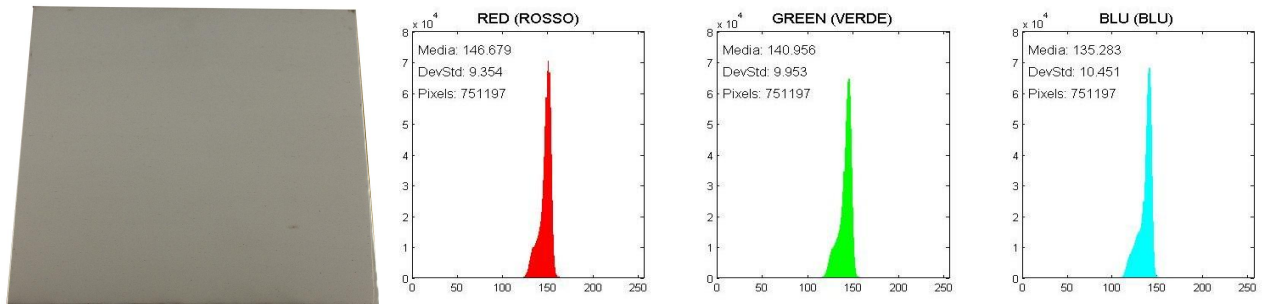


Fig. 4.76 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 3).

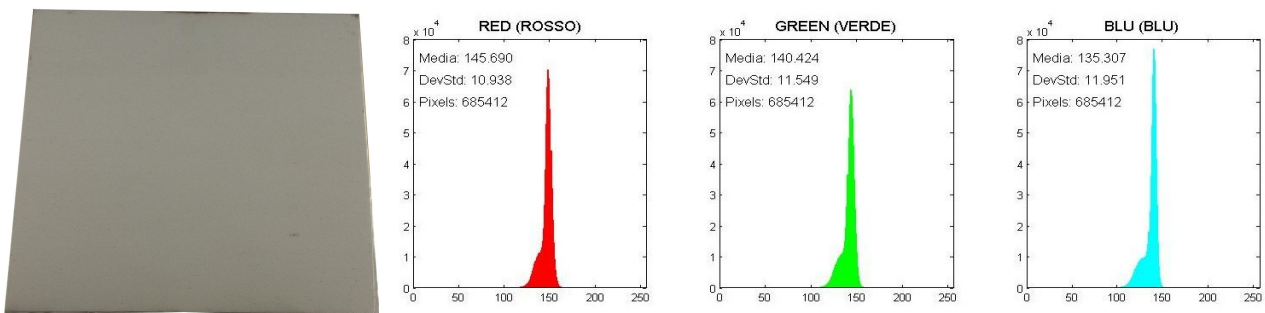


Fig. 4.77 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-1-316-06-B (campione 4).

# C-225-6-316-06-A:

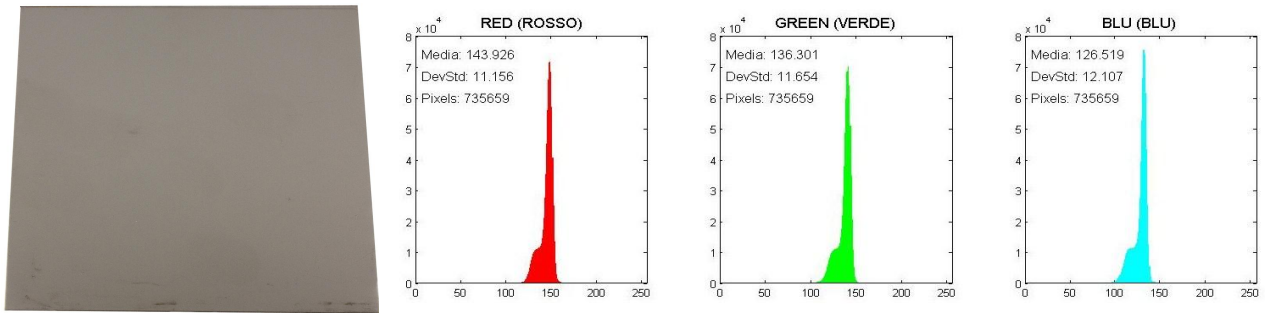


Fig. 4.78 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 1).

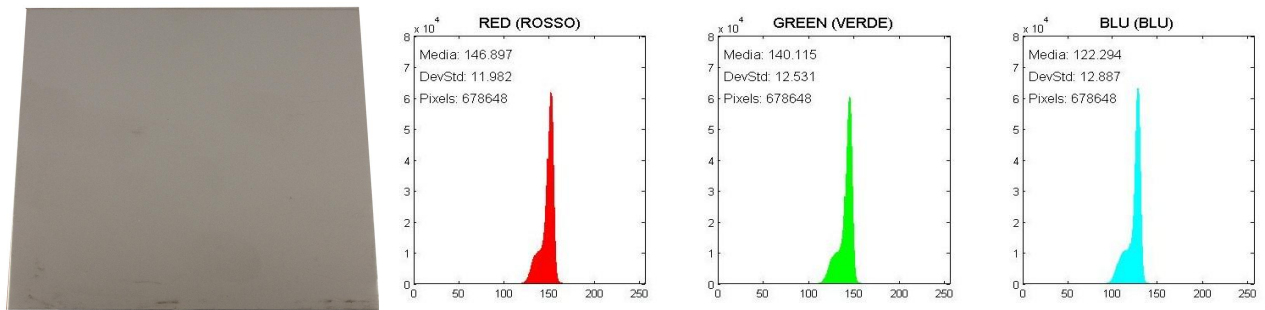


Fig. 4.79 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 2).

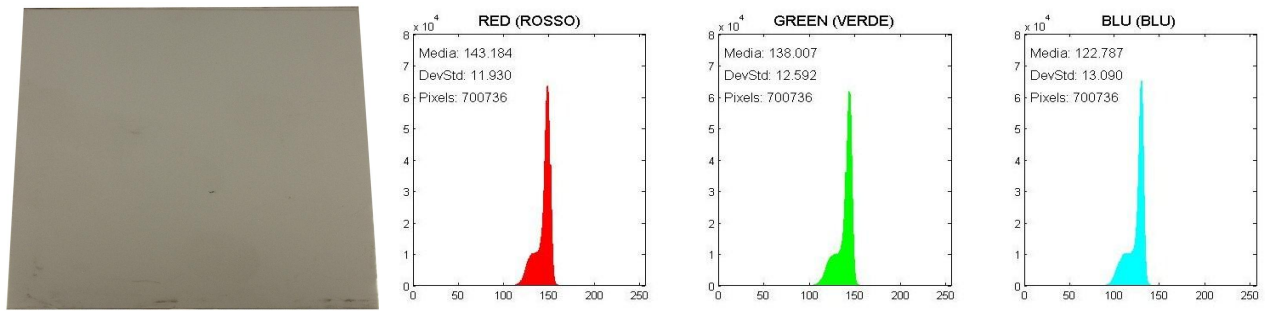


Fig. 4.80 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 3).

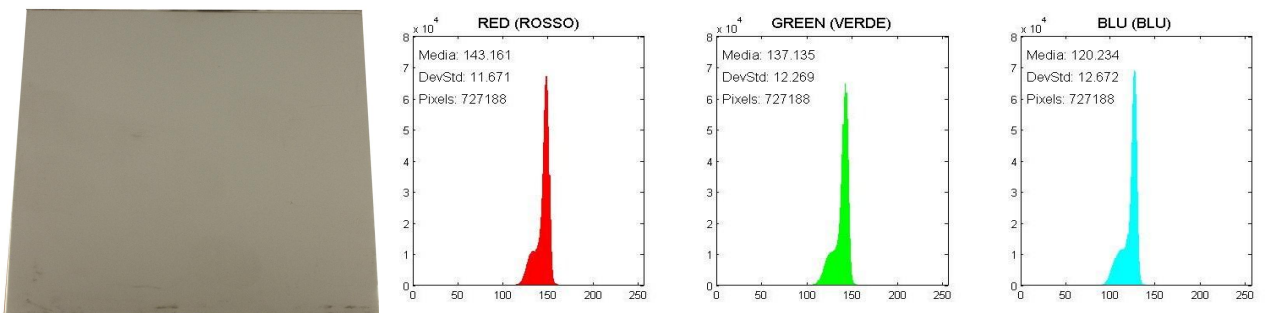


Fig. 4.81 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-A (campione 4).

## C-225-6-316-06-B:

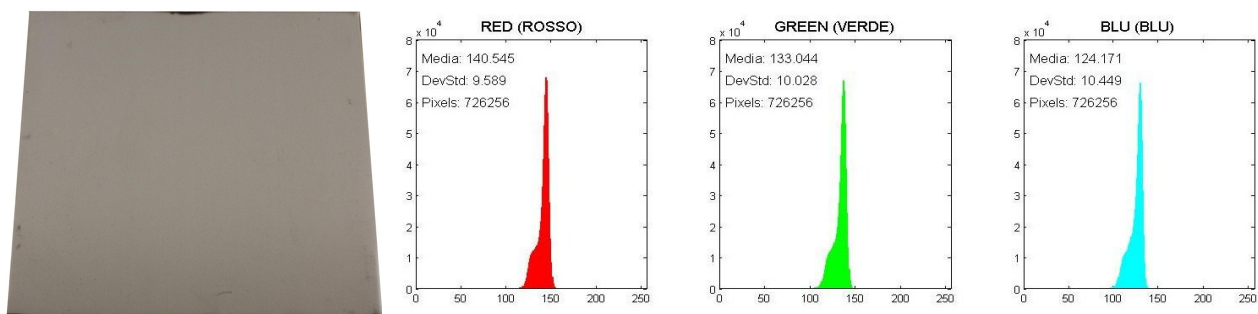


Fig. 4.82 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 1).

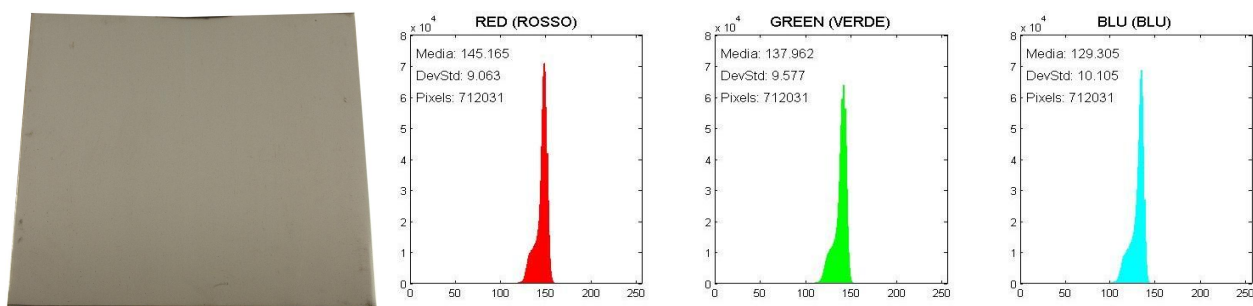


Fig. 4.83 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 2).

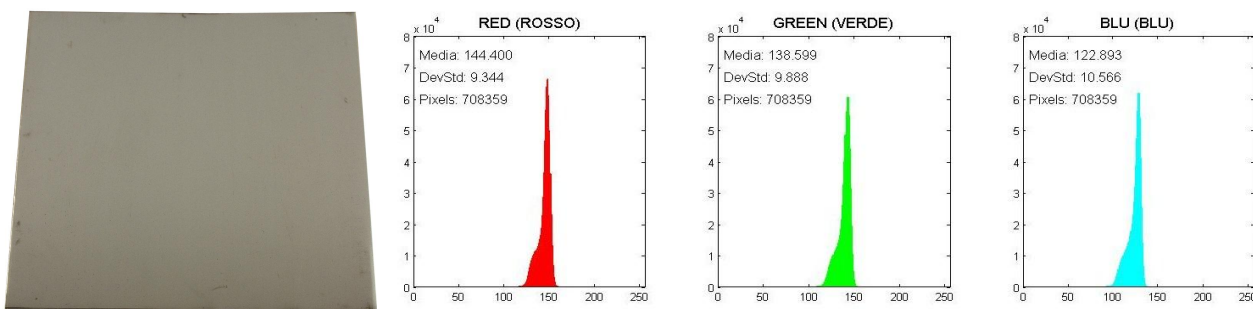


Fig. 4.84 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 3).

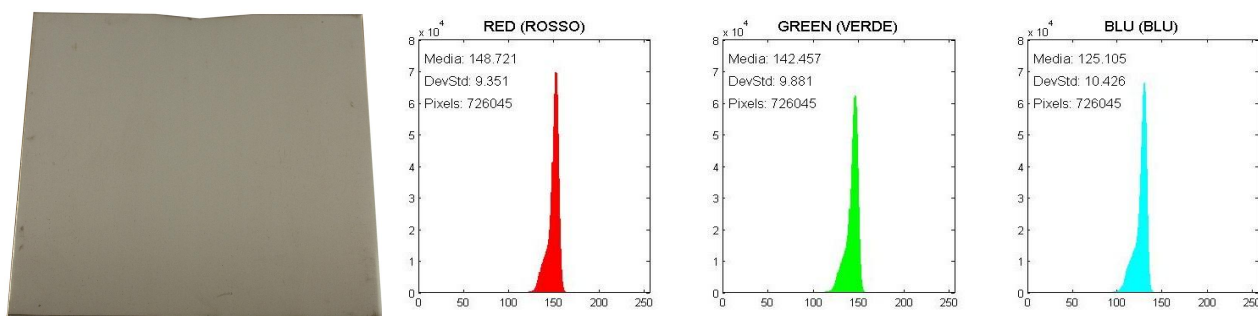


Fig. 4.85 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-225-6-316-06-B (campione 4).

# N-225-1-316-06-A:

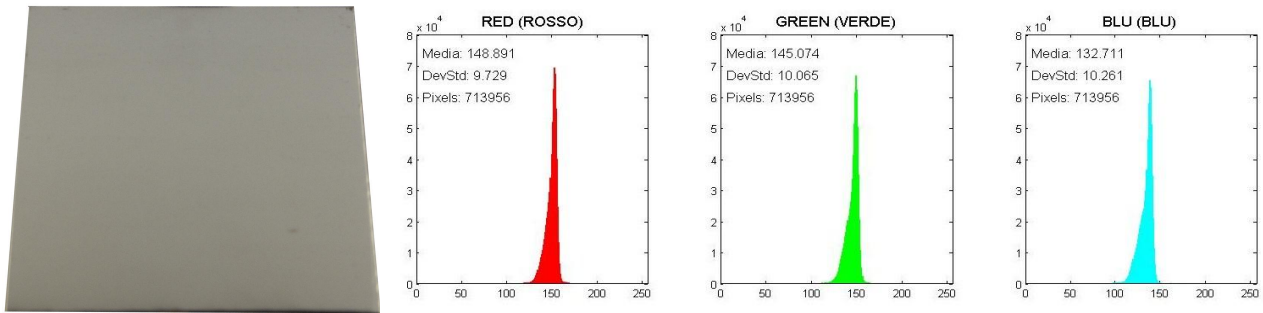


Fig. 4.86 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 1).

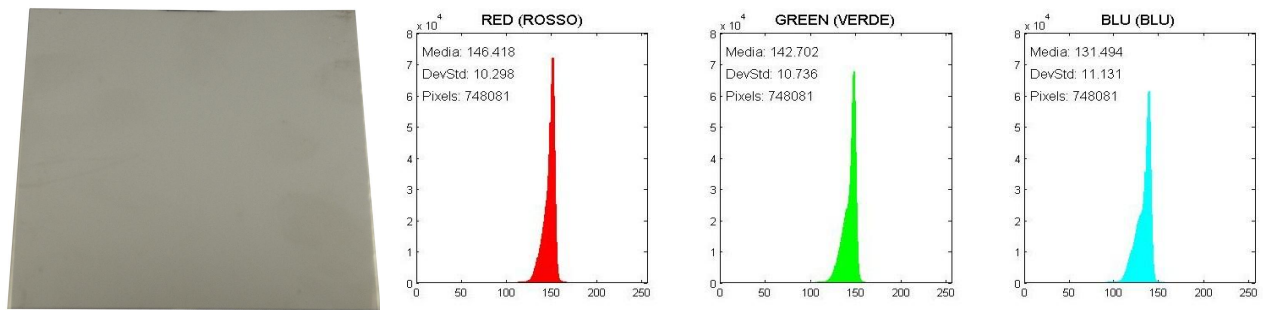


Fig. 4.87 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 2).

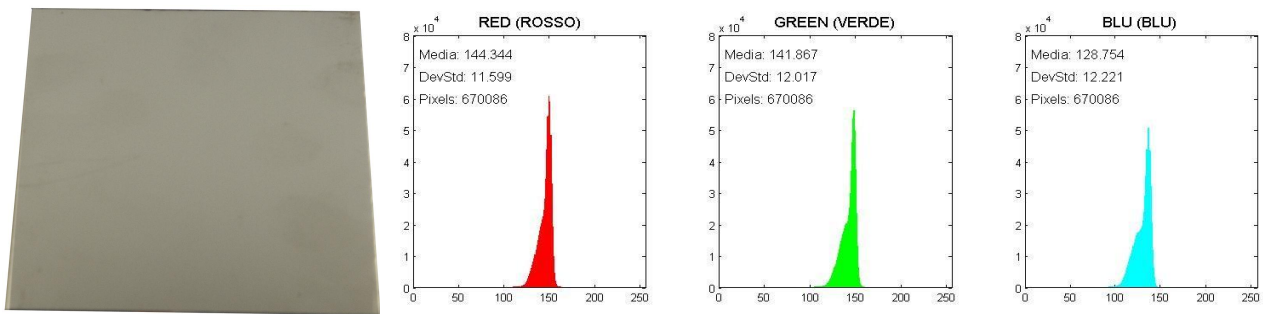


Fig. 4.88 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 3).

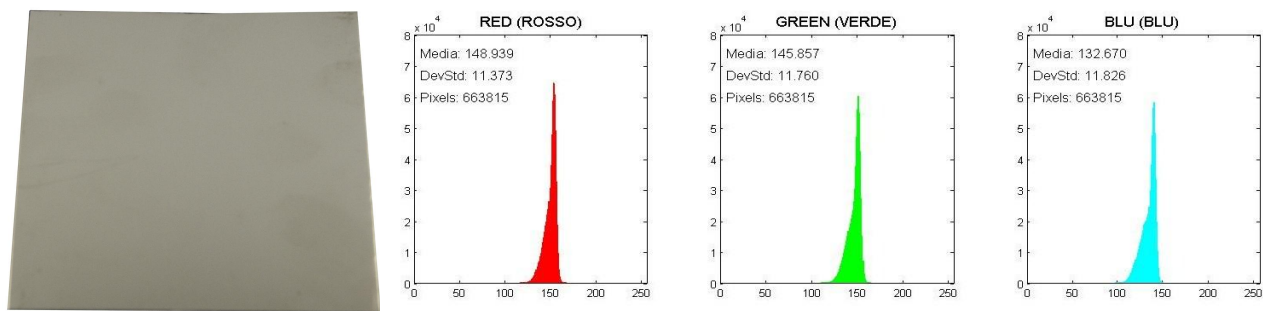


Fig. 4.89 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-A (campione 4).



# N-225-1-316-06-B:

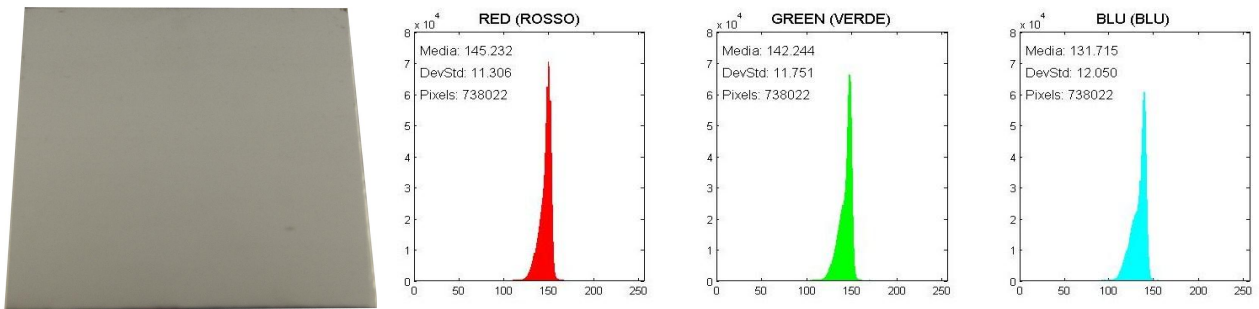


Fig. 4.90 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 1).

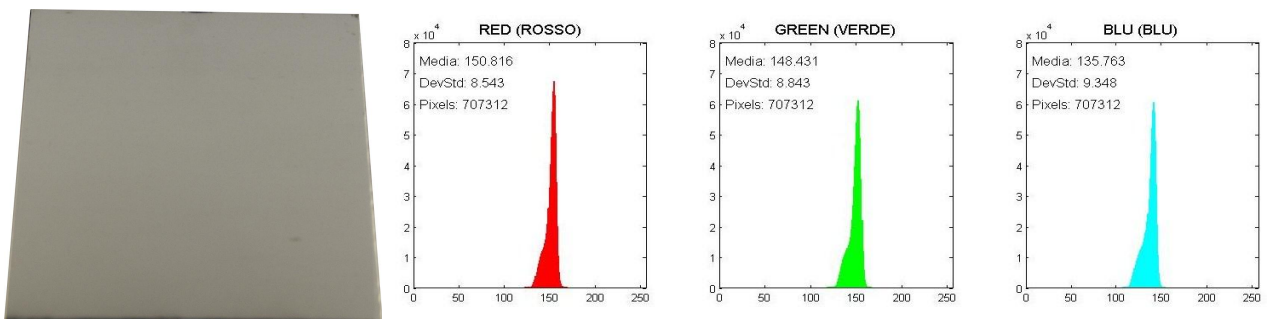


Fig. 4.91 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 2).

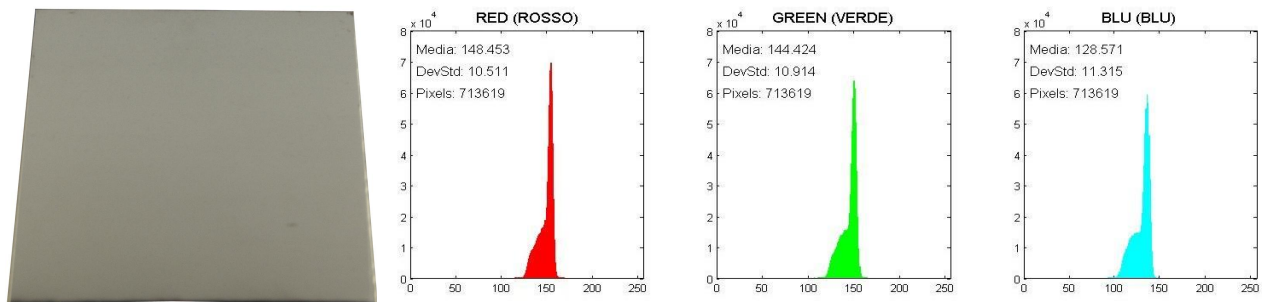


Fig. 4.92 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 3).

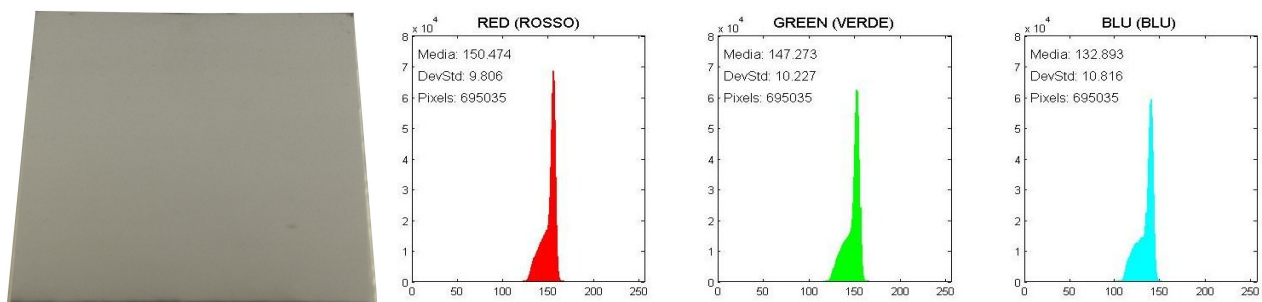


Fig. 4.93 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-1-316-06-B (campione 4).

# N-225-6-316-06-A:

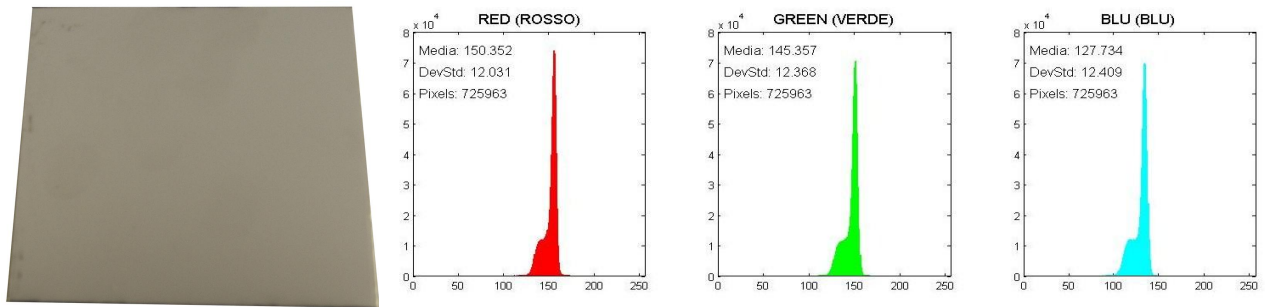


Fig. 4.94 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 1).

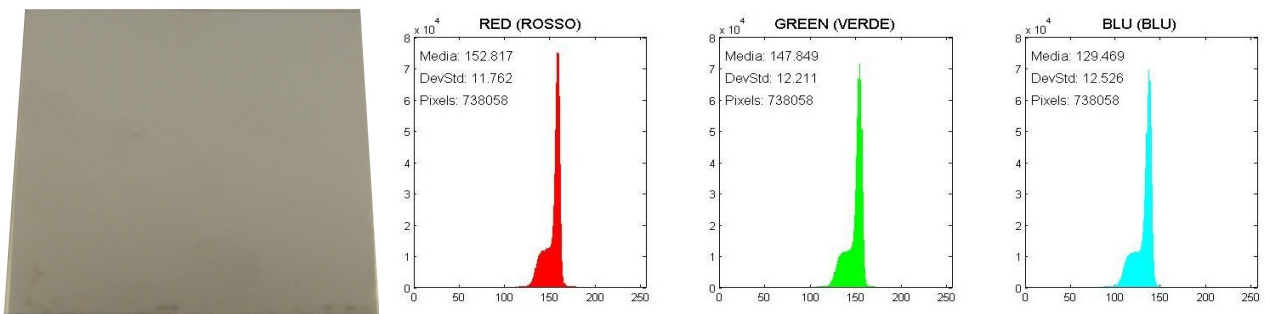


Fig. 4.95 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 2).

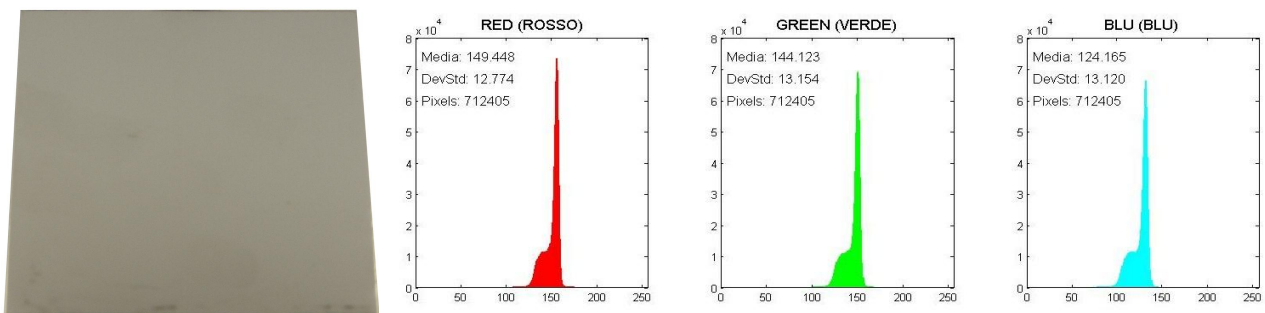


Fig. 4.96 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 3).

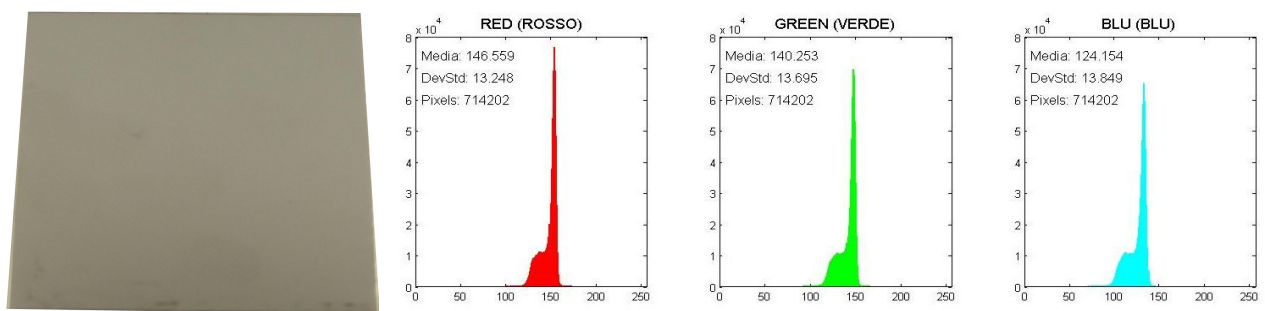


Fig. 4.97 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-A (campione 4).

# N-225-6-316-06-B:

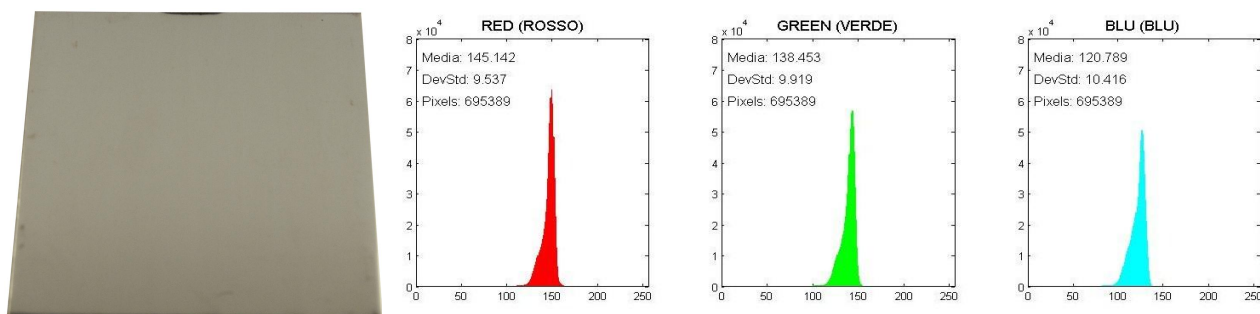


Fig. 4.98 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 1).

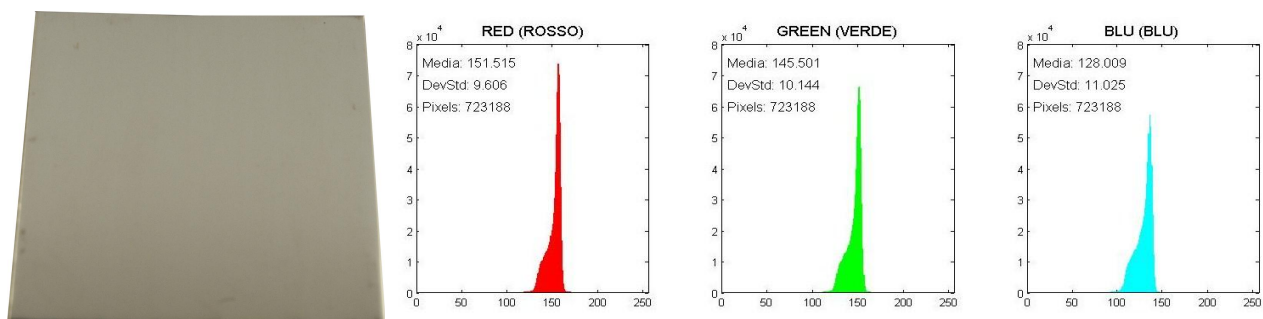


Fig. 4.99 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 2).

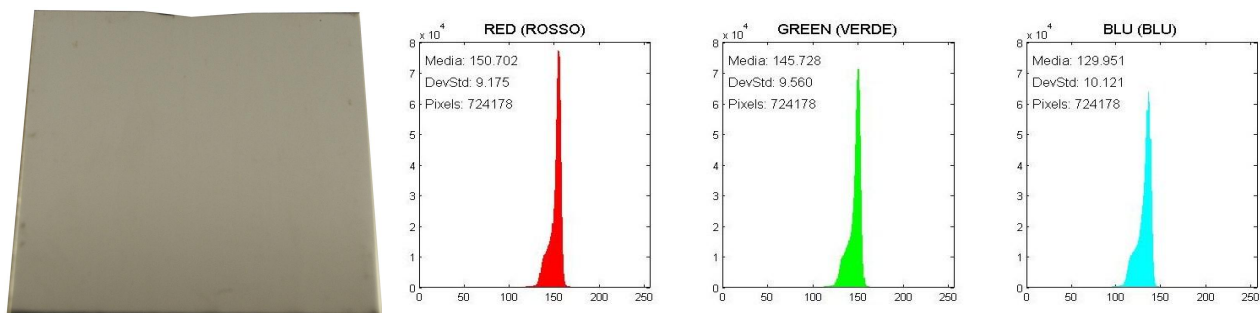


Fig. 4.100 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 3).

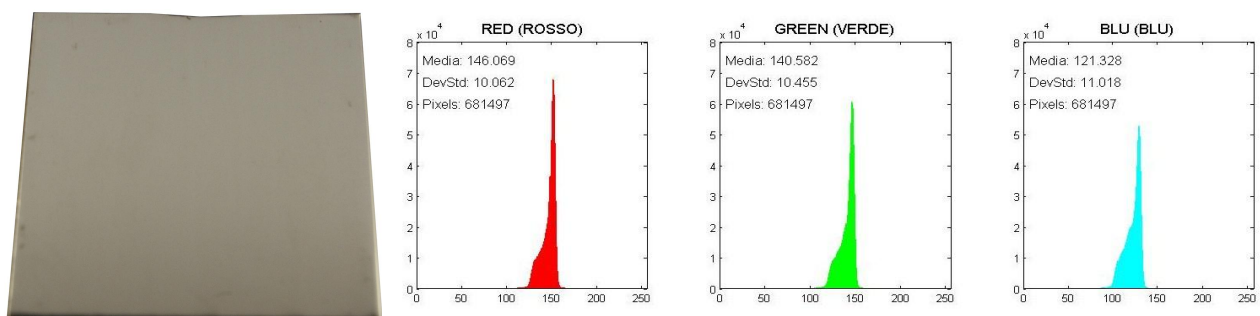


Fig. 4.101 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-225-6-316-06-B (campione 4).

# C-300-1-316-06-A:

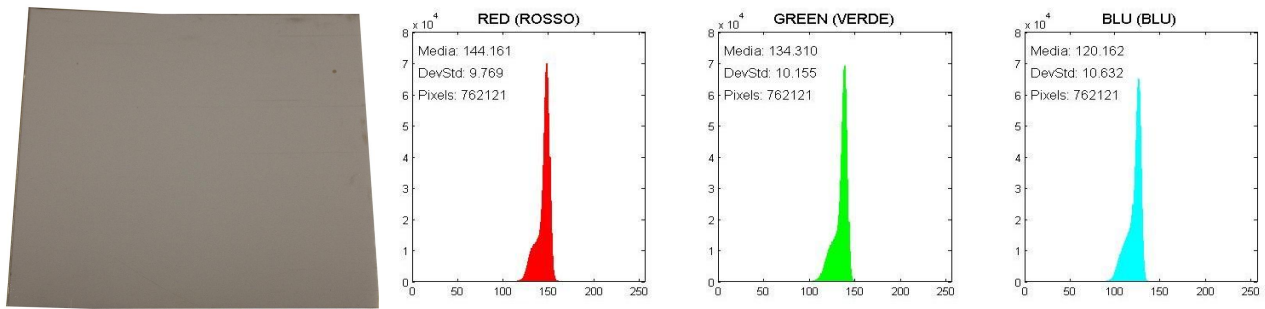


Fig. 4.102 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-A (campione 1).

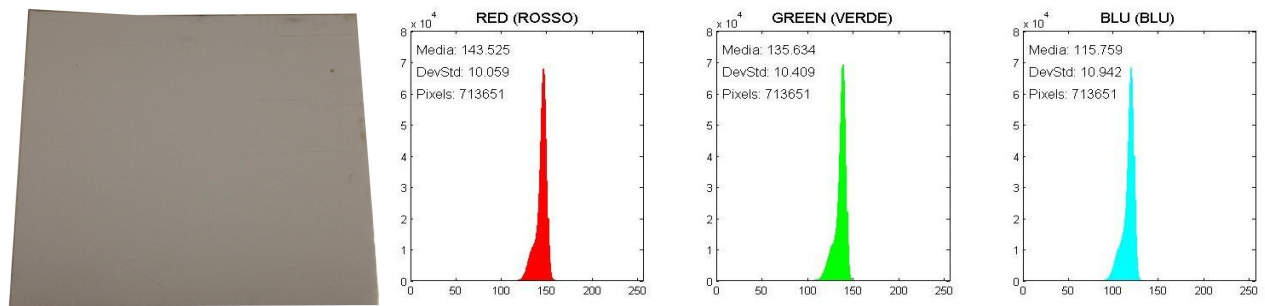


Fig. 4.103 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-A (campione 2).

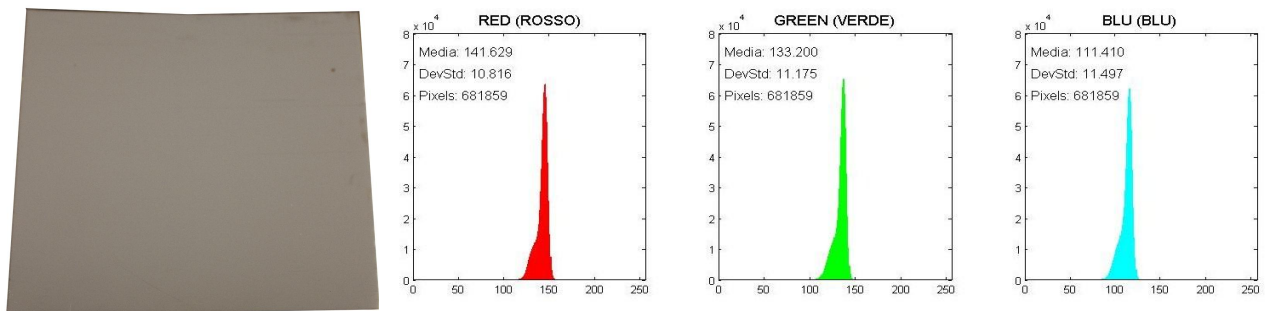


Fig. 4.104 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-A (campione 3).

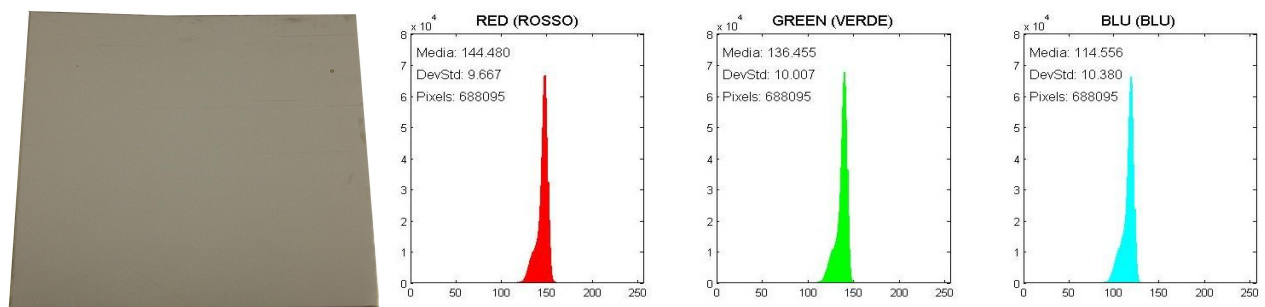


Fig. 4.105 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-A (campione 4).

## C-300-1-316-06-B:

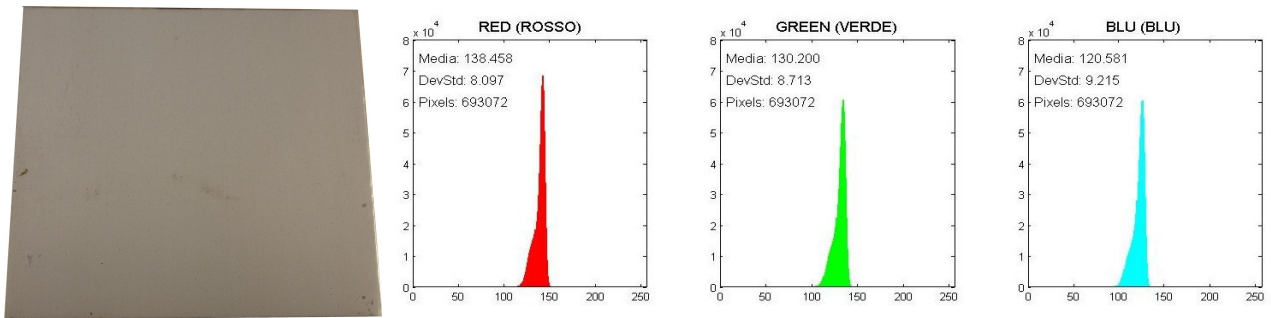


Fig. 4.106 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-B (campione 1).

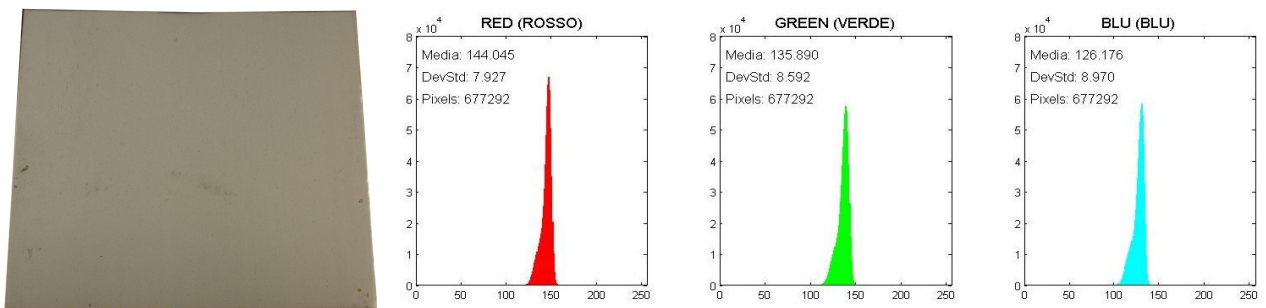


Fig. 4.107 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-B (campione 2).

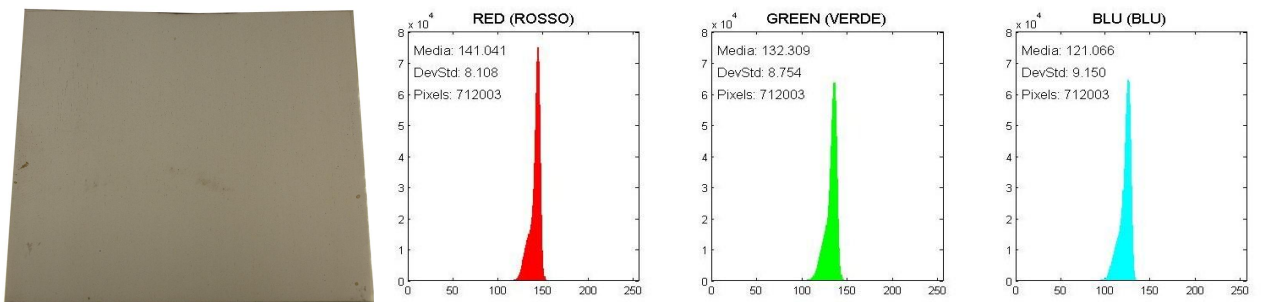


Fig. 4.108 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-B (campione 3).

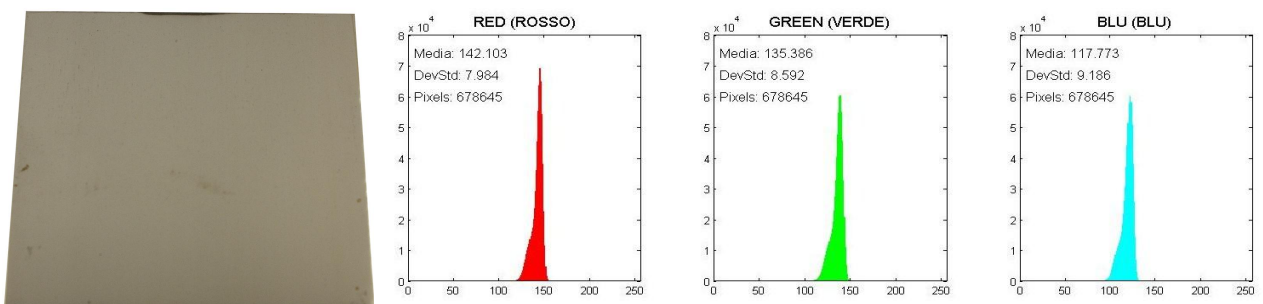


Fig. 4.109 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-1-316-06-B (campione 4).

# C-300-6-316-06-A:

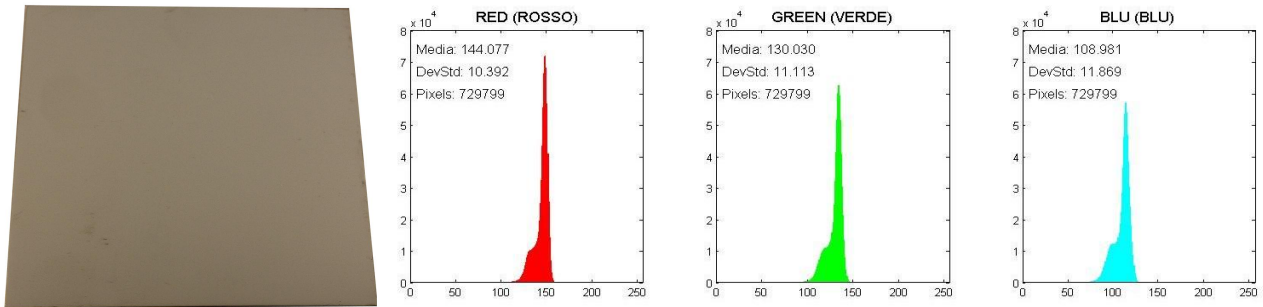


Fig. 4.110 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-A (campione 1).

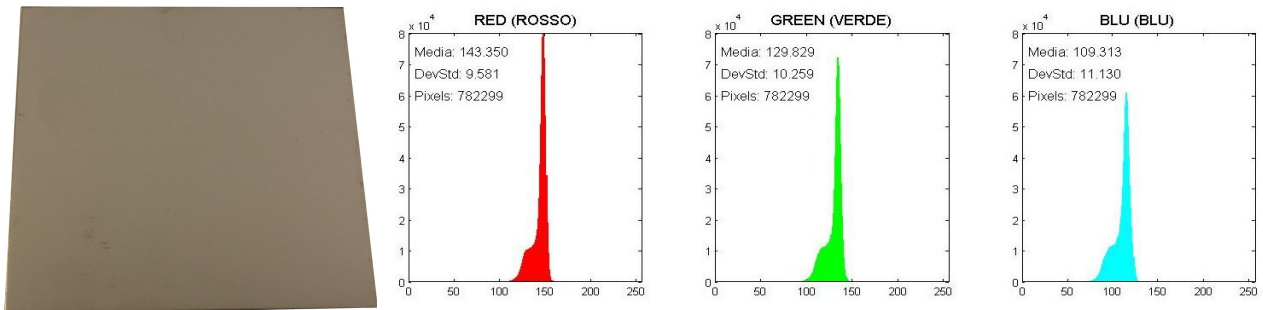


Fig. 4.111 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-A (campione 2).

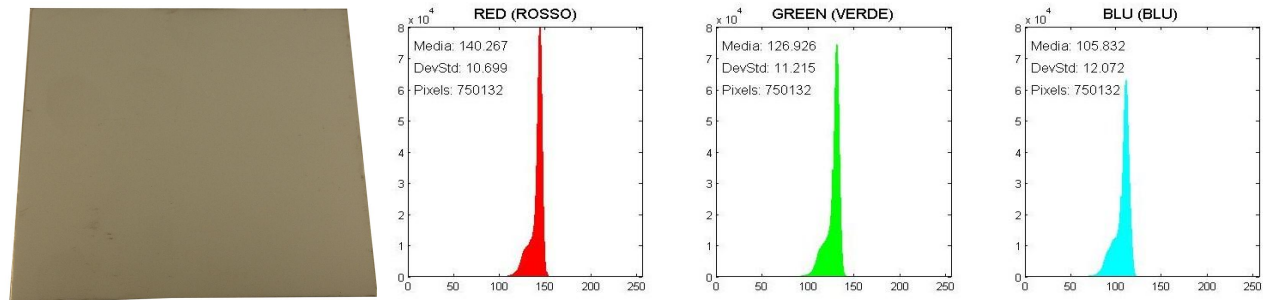


Fig. 4.112 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-A (campione 3).

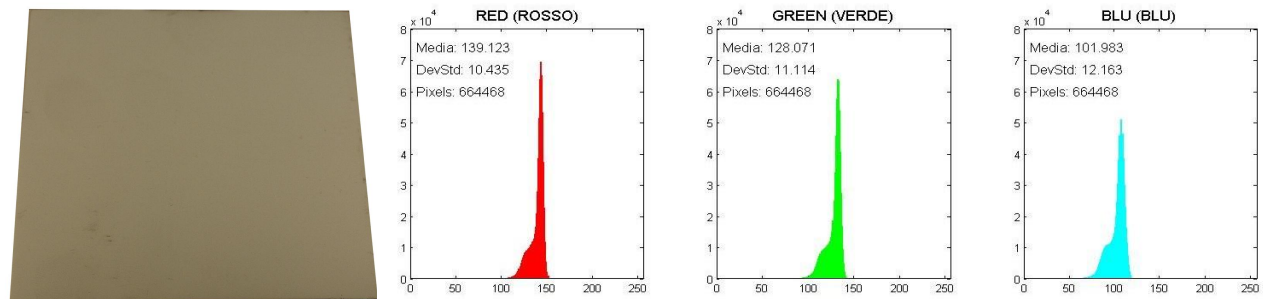


Fig. 4.113 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-A (campione 4).

## C-300-6-316-06-B:

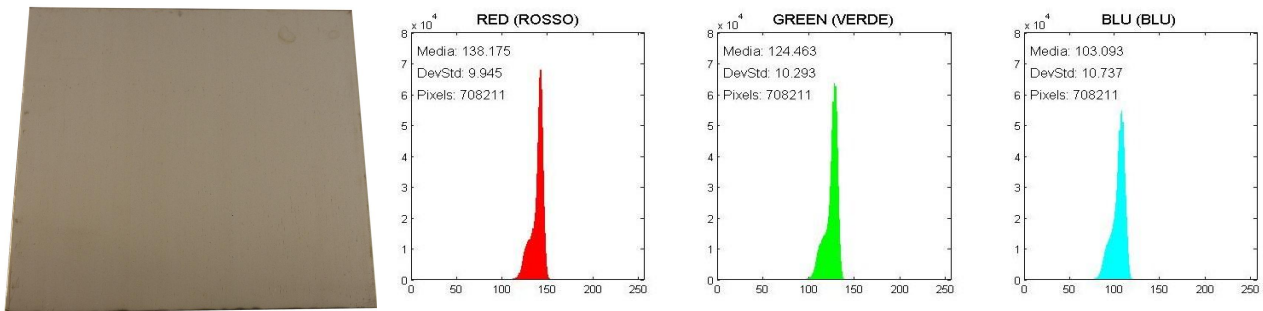


Fig. 4.114 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-B (campione 1).

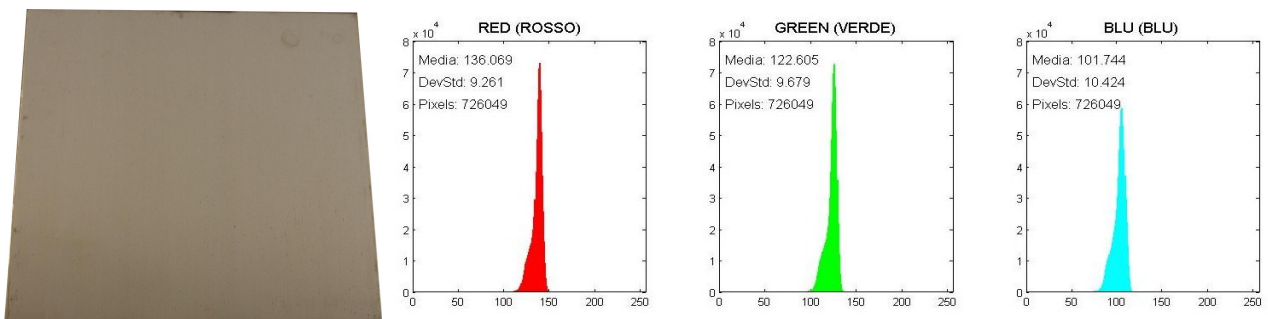


Fig. 4.115 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-B (campione 2).

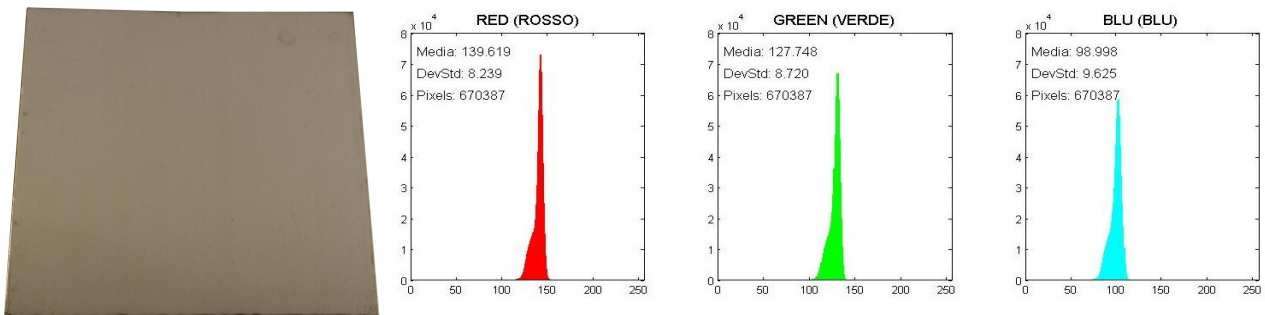


Fig. 4.116 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-B (campione 3).

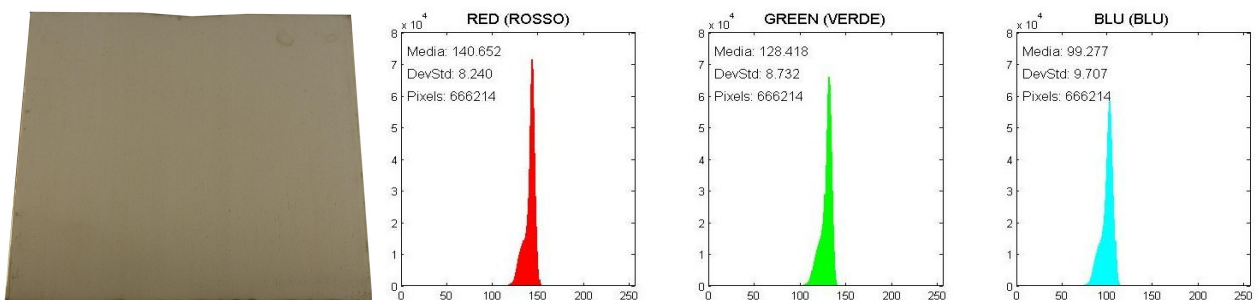


Fig. 4.117 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-300-6-316-06-B (campione 4).

## N-300-1-316-06-A:

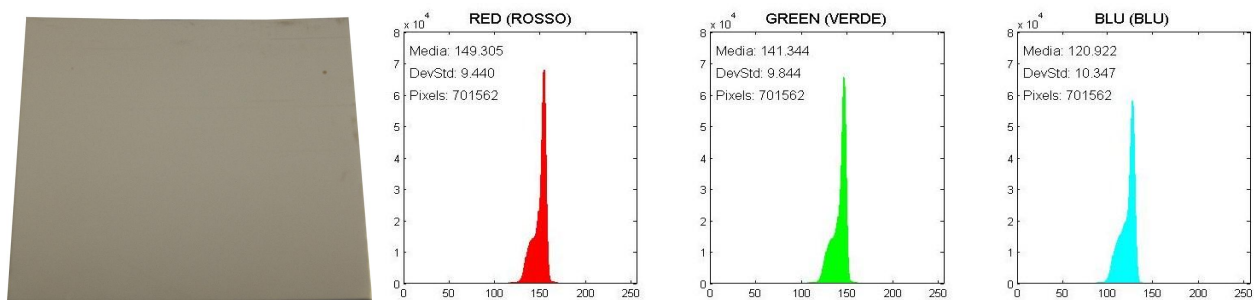


Fig. 4.118 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-A (campione 1).

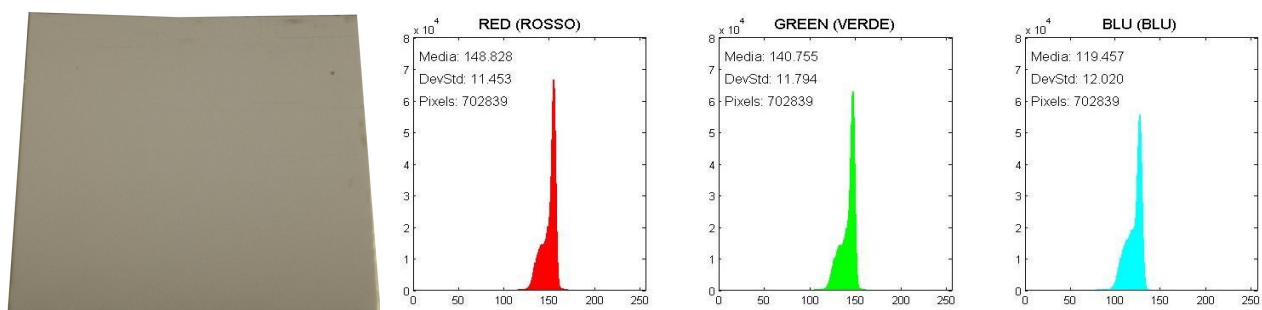


Fig. 4.119 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-A (campione 2).

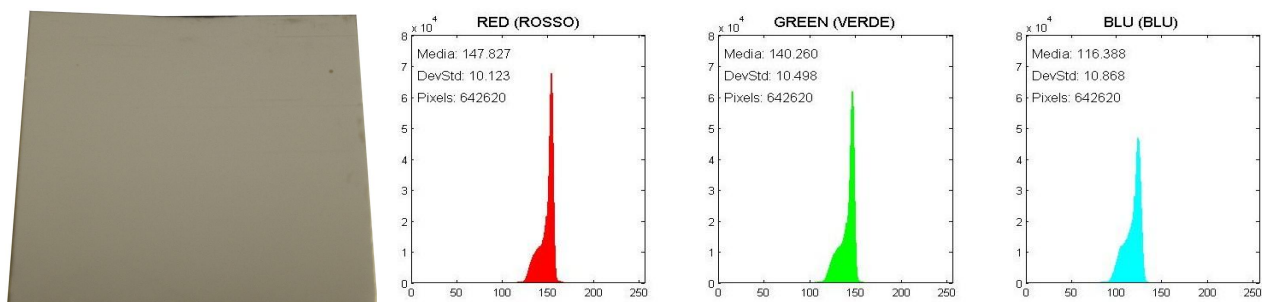


Fig. 4.120 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-A (campione 3).

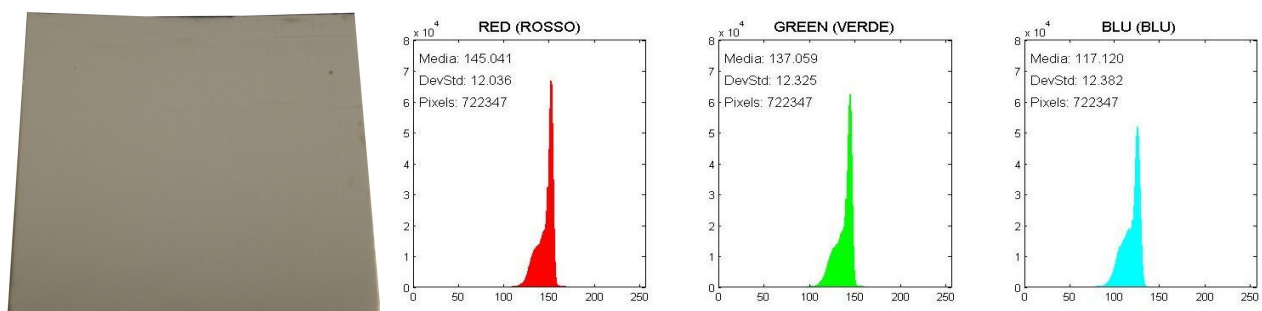


Fig. 4.121 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-A (campione 4).



# N-300-1-316-06-B:

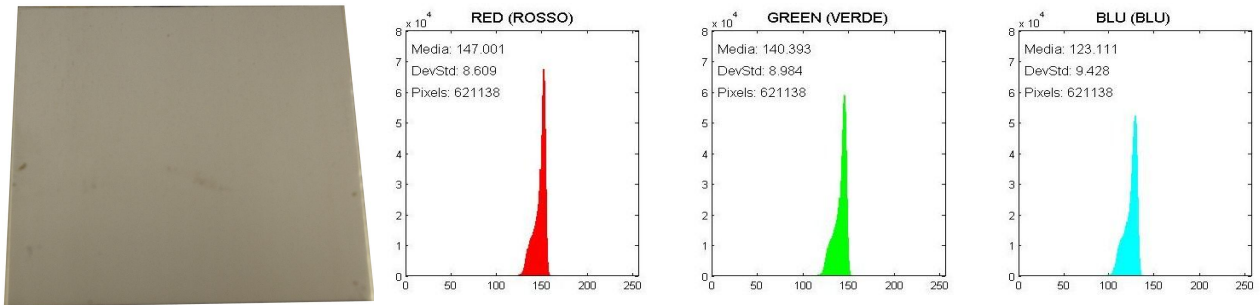


Fig. 4.122 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-B (campione 1).

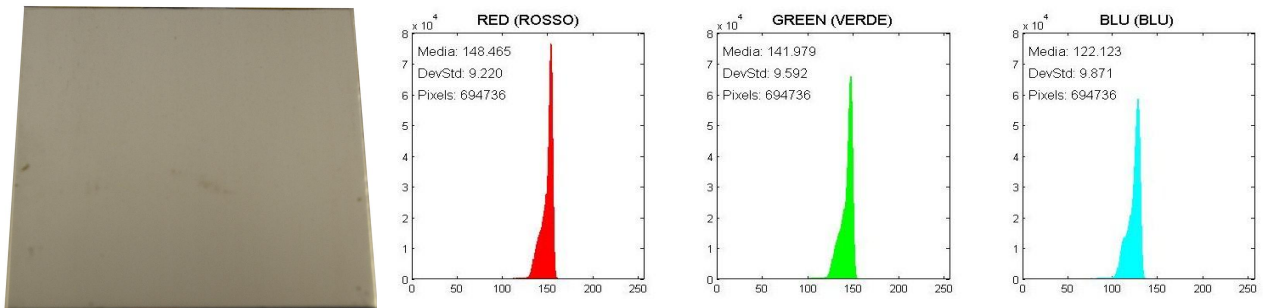


Fig. 4.123 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-B (campione 2).

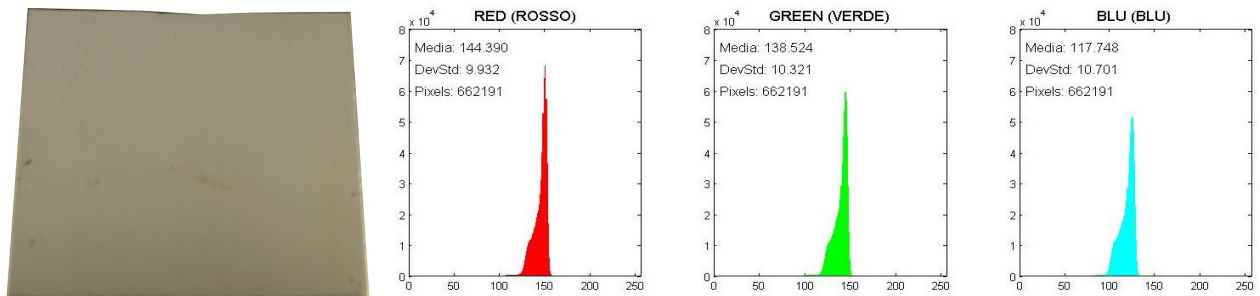


Fig. 4.124 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-B (campione 3).

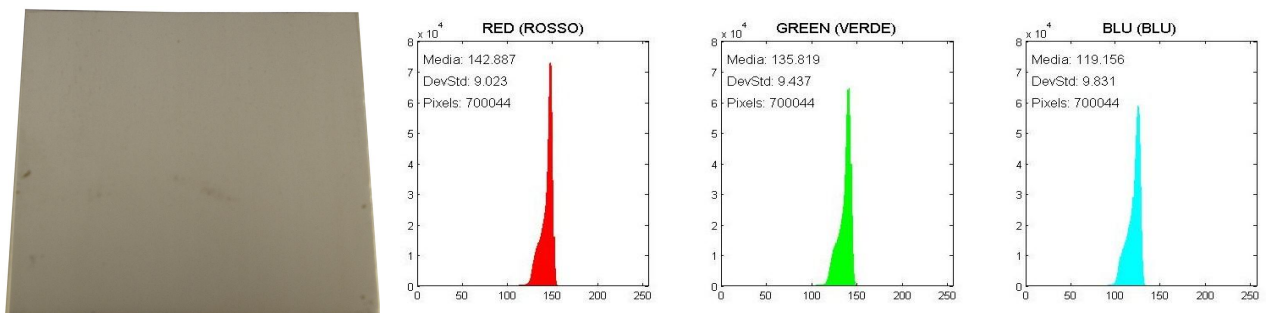


Fig. 4.125 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-1-316-06-B (campione 4).

# N-300-6-316-06-A:

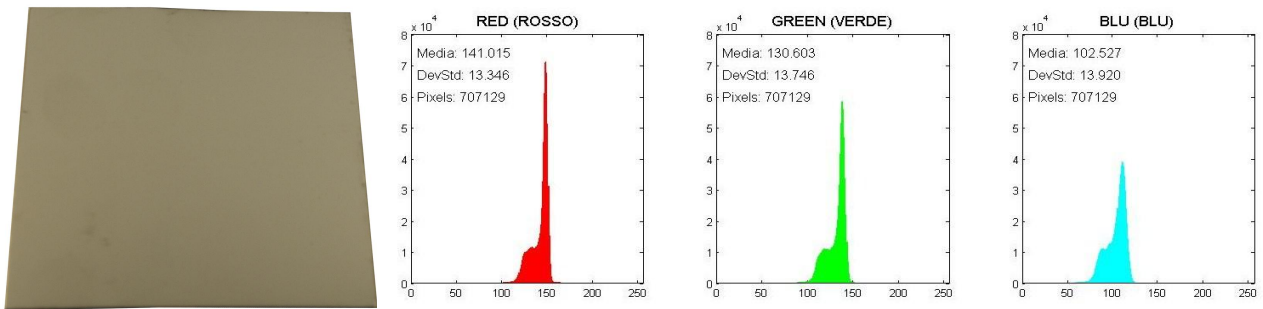


Fig. 4.126 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-A (campione 1).

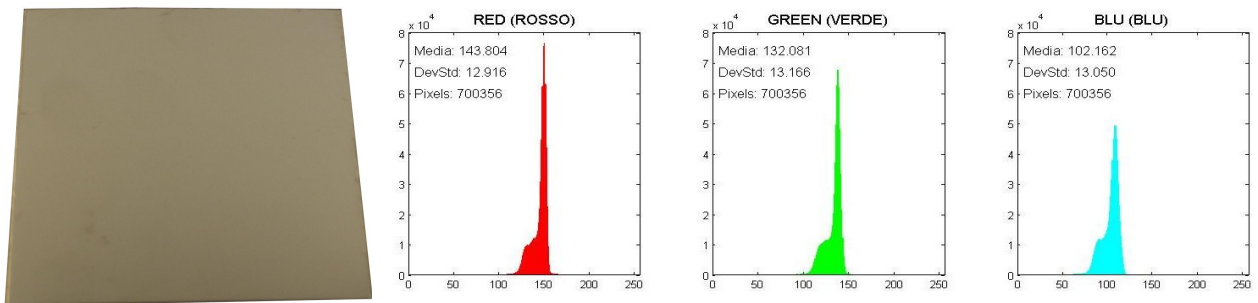


Fig. 4.127 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-A (campione 2).

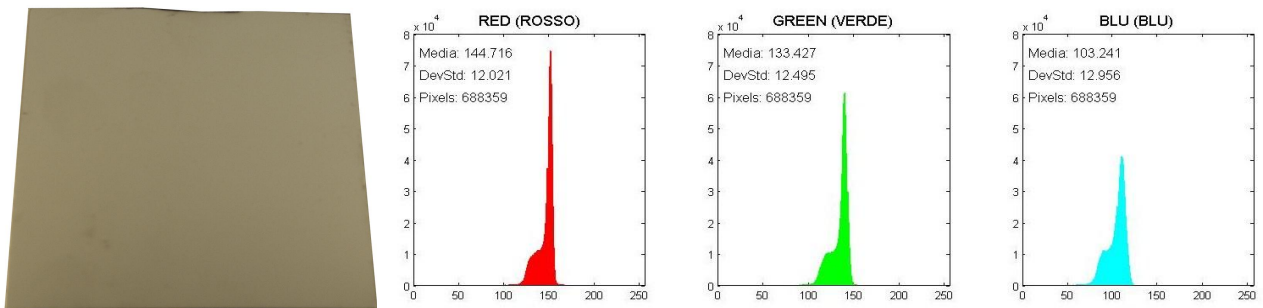


Fig. 4.128 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-A (campione 3).

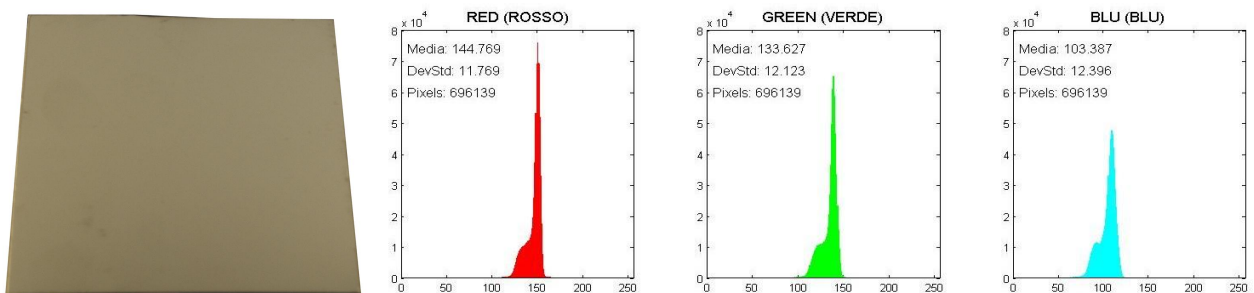


Fig. 4.129 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-A (campione 4).

# N-300-6-316-06-B:

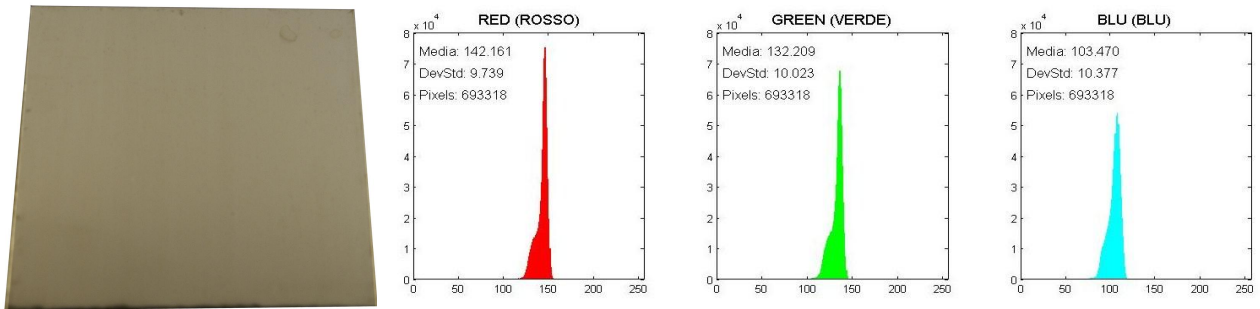


Fig. 4.130 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-B (campione 1).

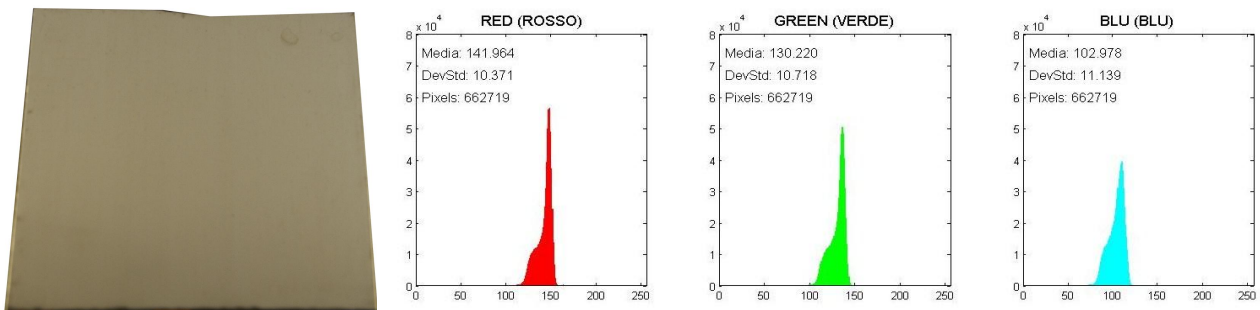


Fig. 4.131 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-B (campione 2).

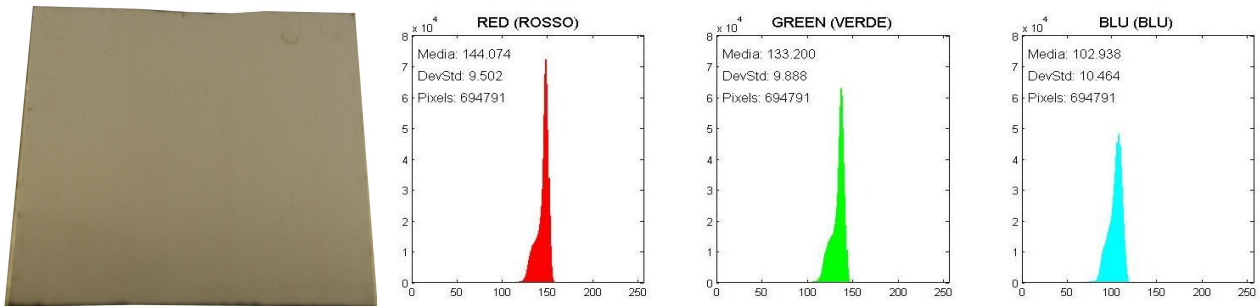


Fig. 4.132 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-B (campione 3).

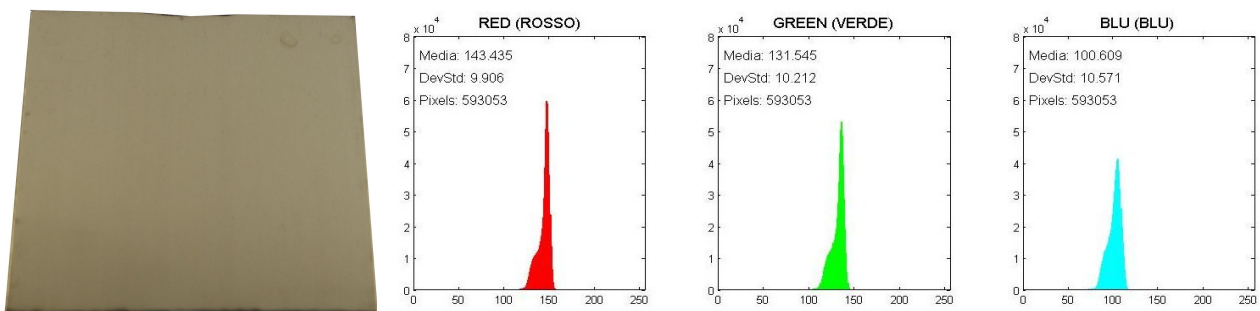


Fig. 4.133 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-300-6-316-06-B (campione 4).

# C-340-1-316-06-A:

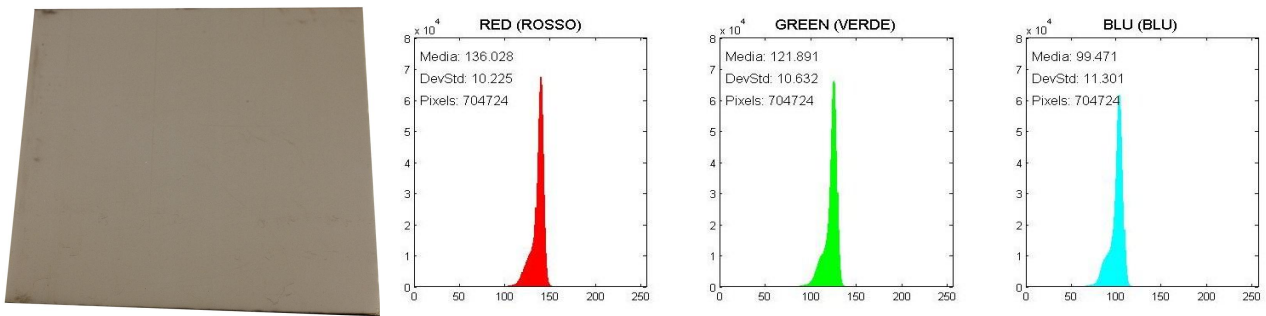


Fig. 4.134 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-A (campione 1).

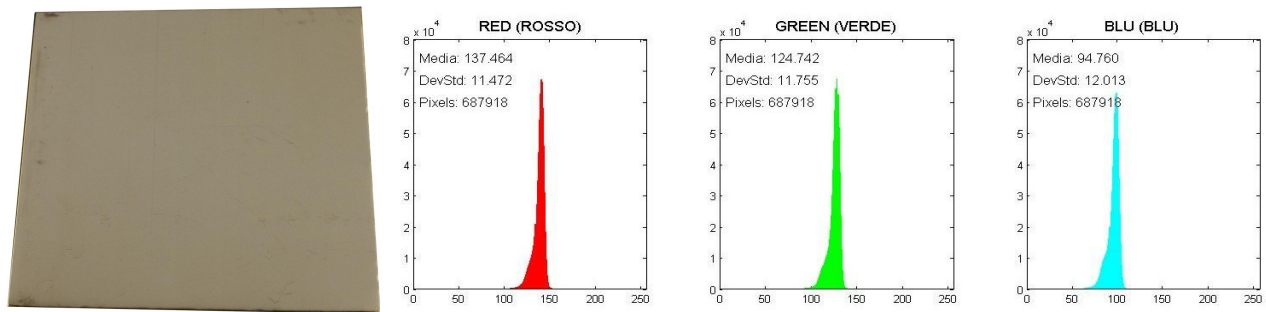


Fig. 4.135 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-A (campione 2).

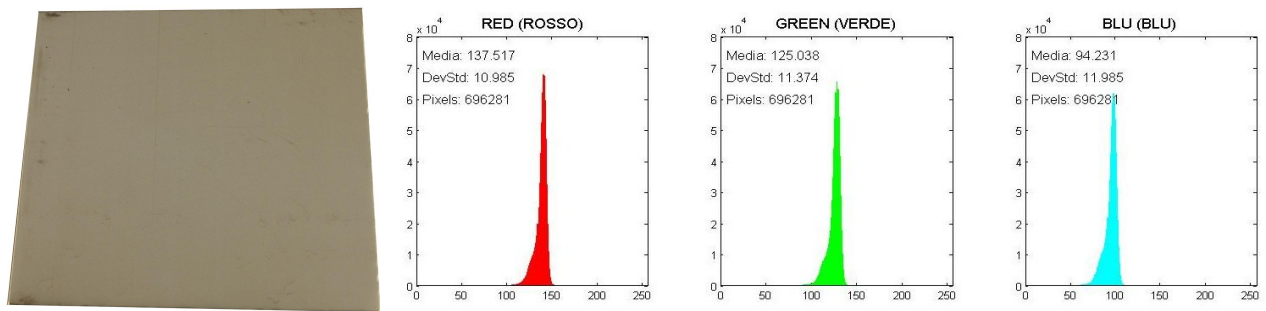


Fig. 4.136 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-A (campione 3).

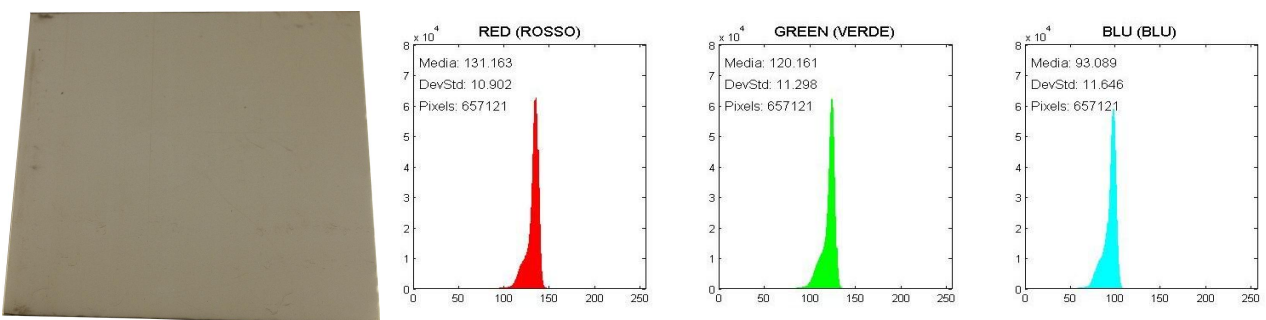


Fig. 4.137 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-A (campione 4).

## C-340-1-316-06-B:

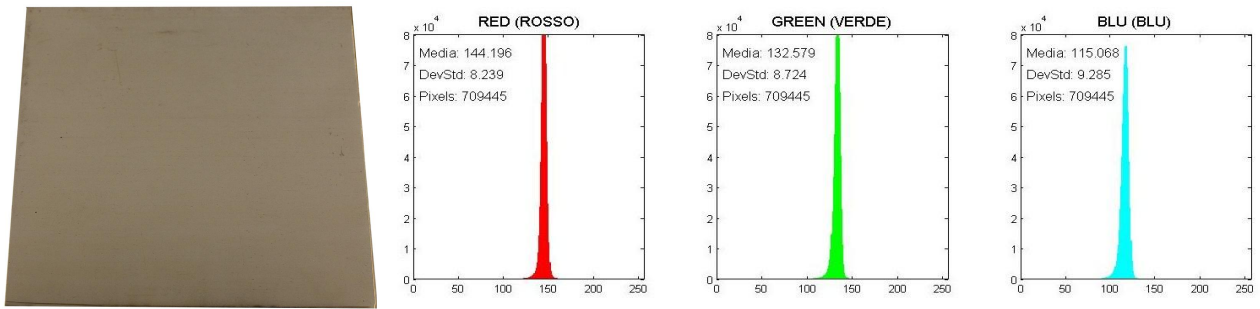


Fig. 4.138 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-B (campione 1).

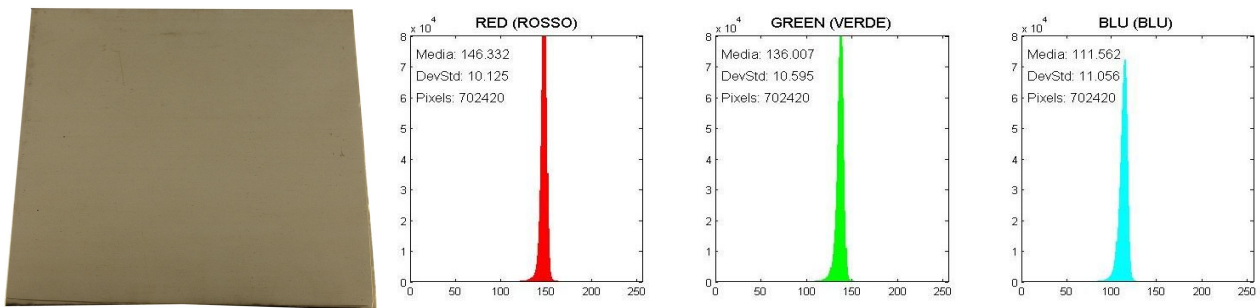


Fig. 4.139 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-B (campione 2).

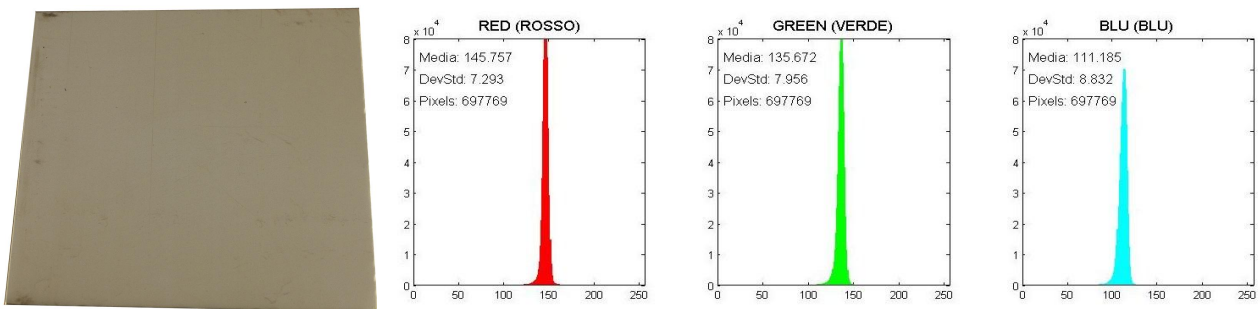


Fig. 4.140 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-B (campione 3).

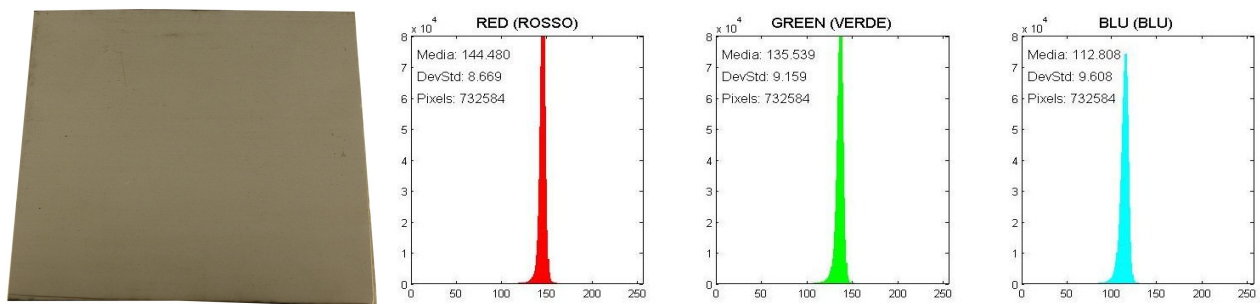


Fig. 4.141 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-1-316-06-B (campione 4).

## C-340-6-316-06-A:

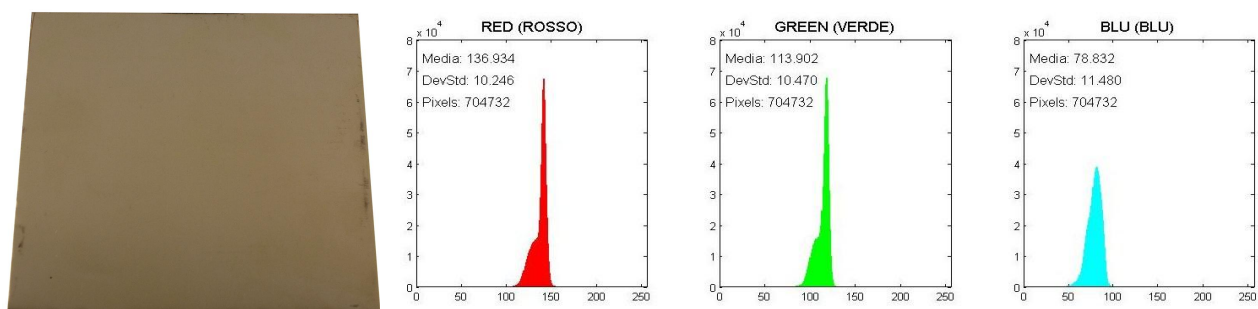


Fig. 4.142 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-A (campione 1).

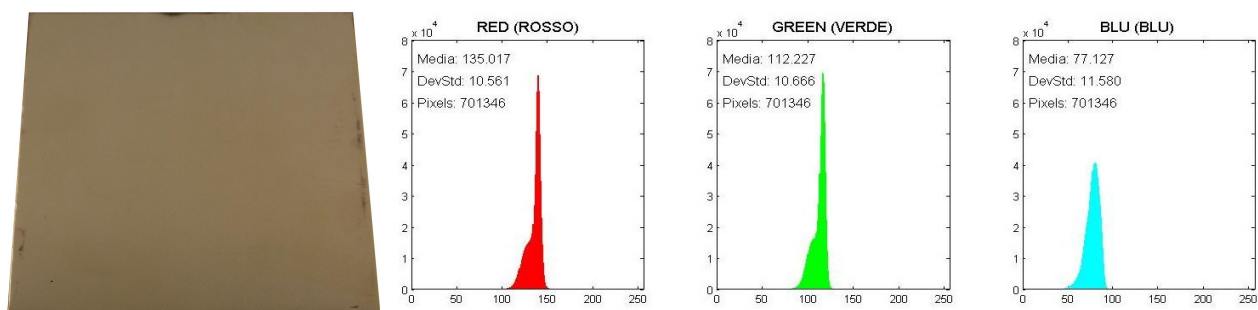


Fig. 4.143 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-A (campione 2).

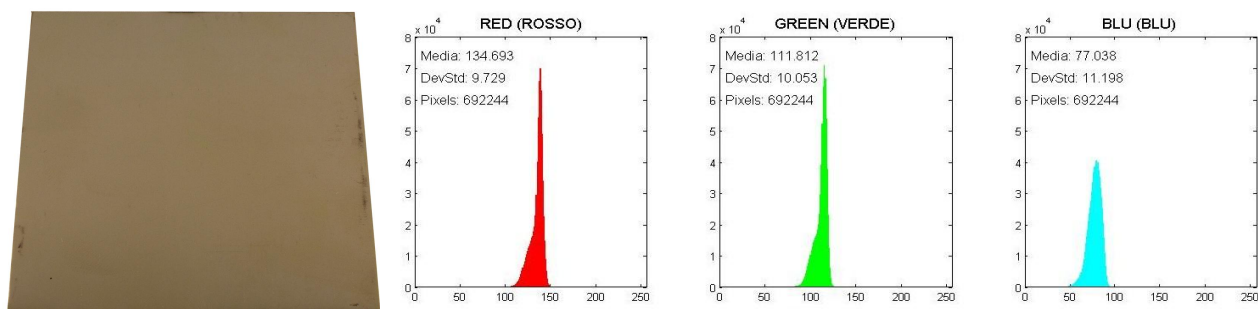


Fig. 4.144 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-A (campione 3).

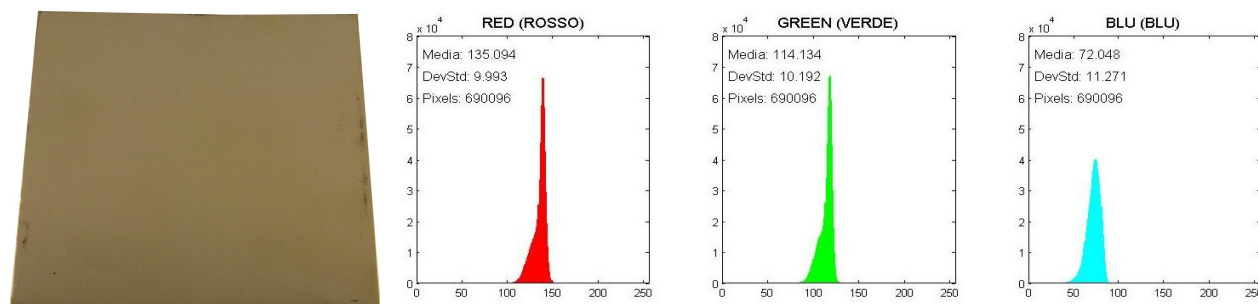


Fig. 4.145 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-A (campione 4).

## C-340-6-316-06-B:

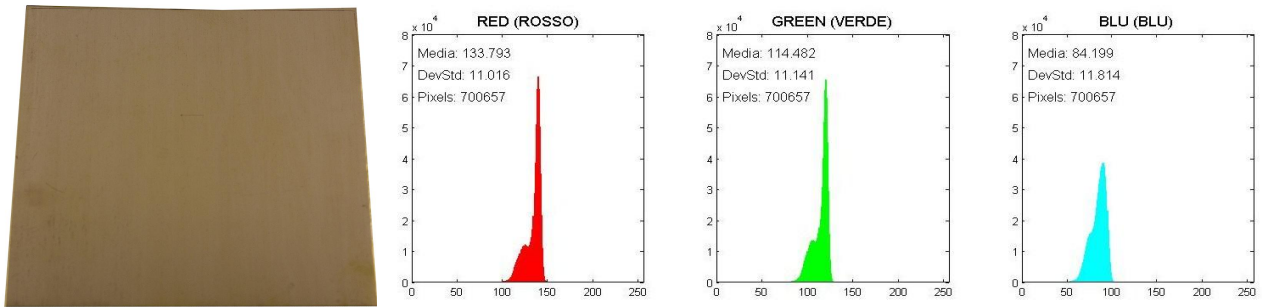


Fig. 4.146 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-B (campione 1).

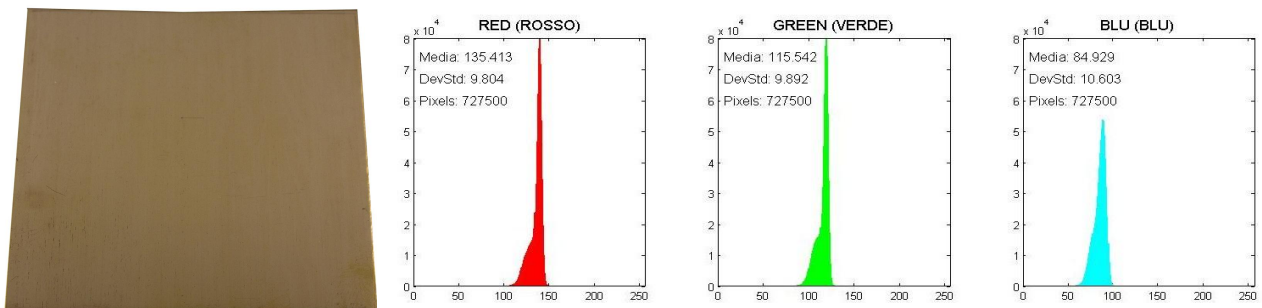


Fig. 4.147 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-B (campione 2).

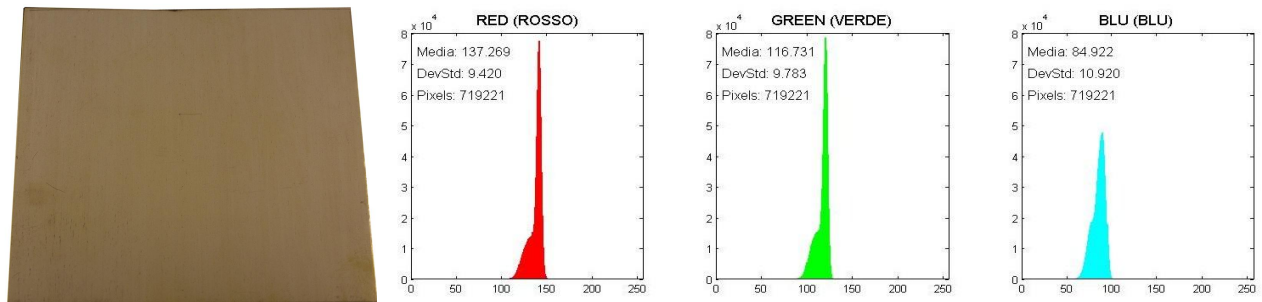


Fig. 4.148 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-B (campione 3).

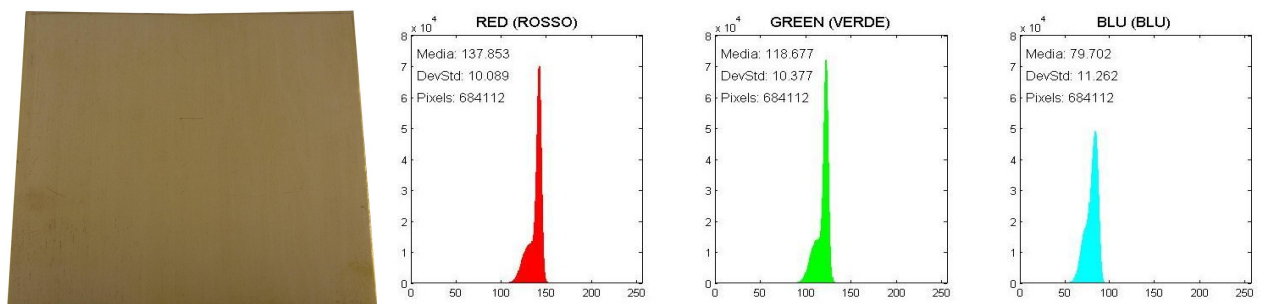


Fig. 4.149 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-340-6-316-06-B (campione 4).

# N-340-1-316-06-A:

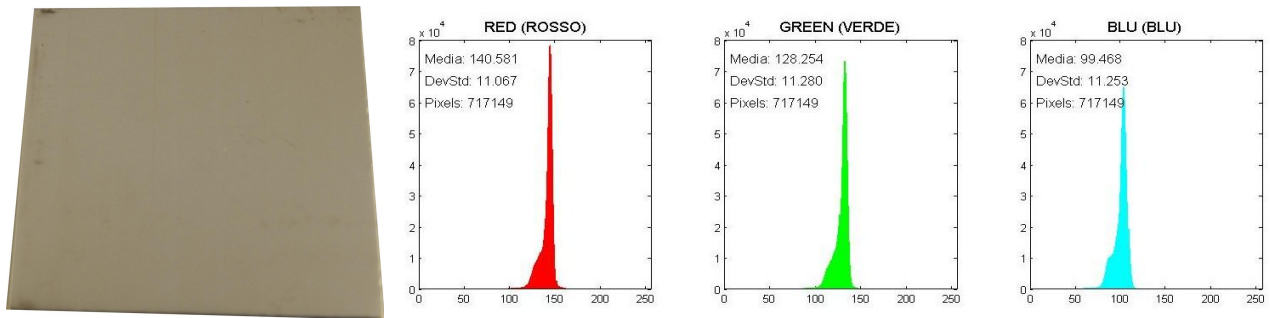


Fig. 4.150 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-A (campione 1).

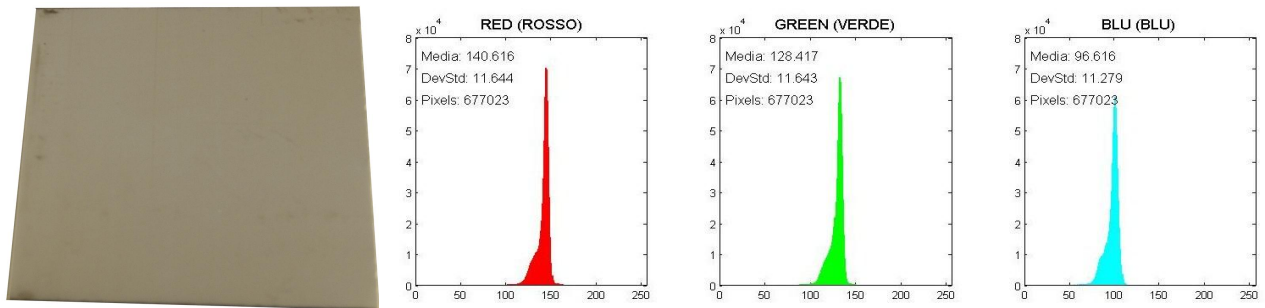


Fig. 4.151 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-A (campione 2).

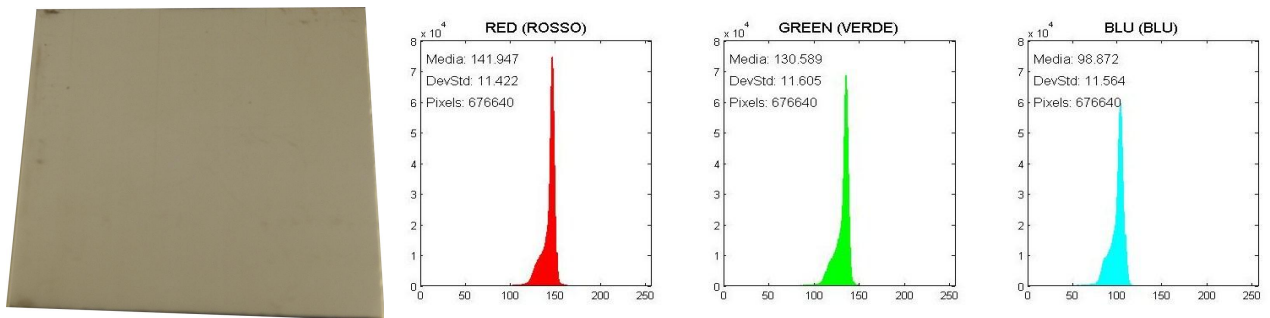


Fig. 4.152 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-A (campione 2).

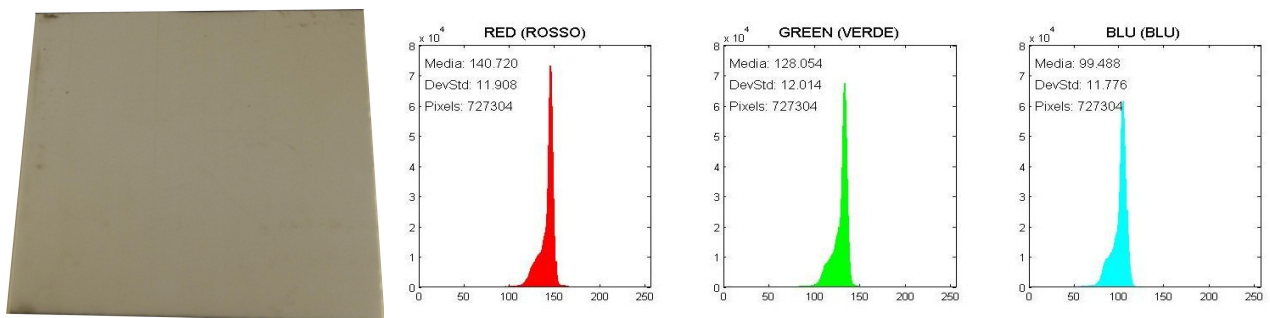


Fig. 4.153 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-A (campione 4).



# N-340-1-316-06-B:

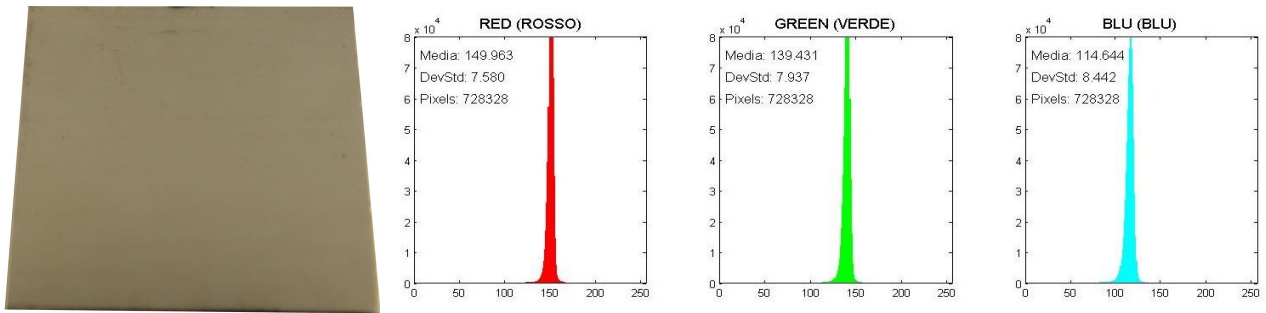


Fig. 4.154 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-B (campione 1).

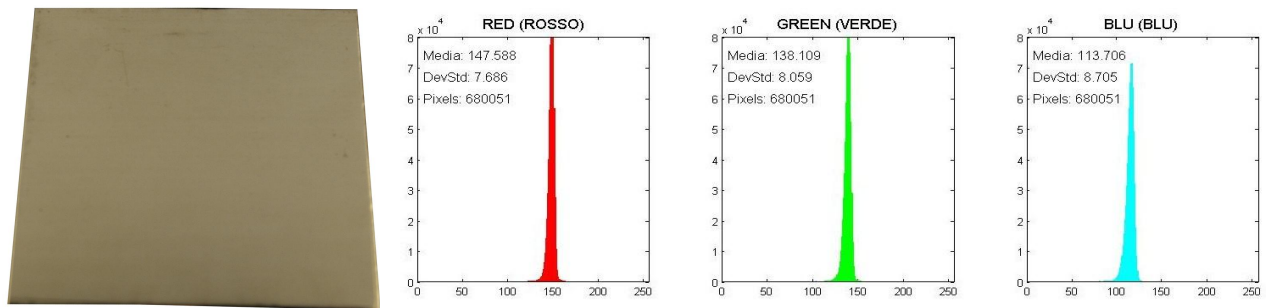


Fig. 4.155 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-B (campione 2).

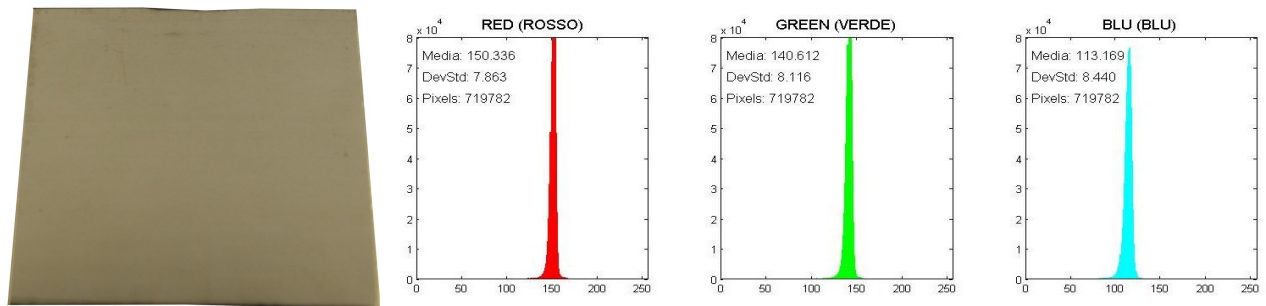


Fig. 4.156 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-B (campione 3).

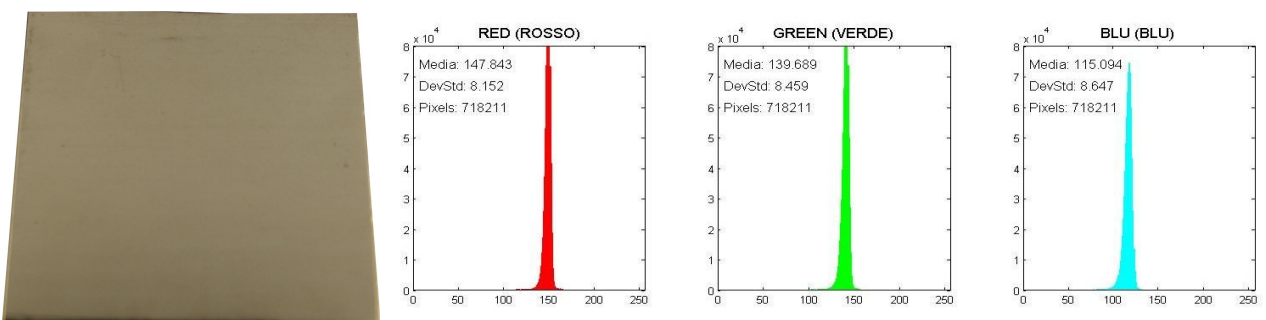


Fig. 4.157 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-1-316-06-B (campione 4).

# N-340-6-316-06-A:

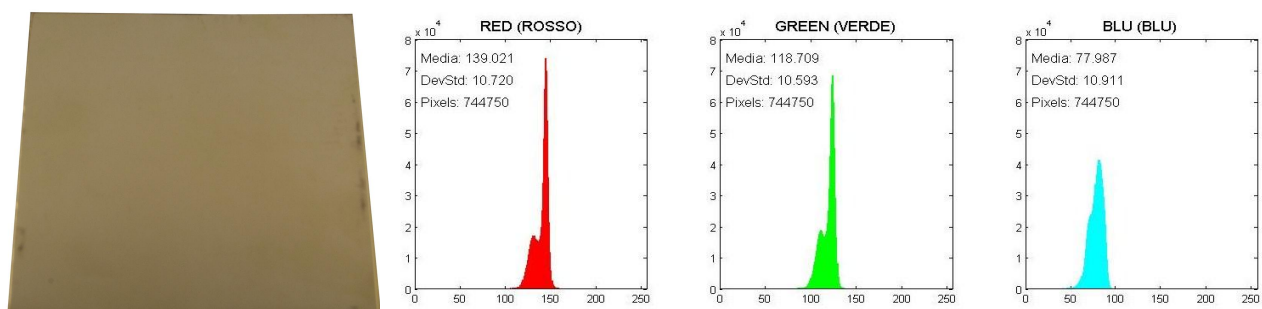


Fig. 4.158 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-A (campione 1).

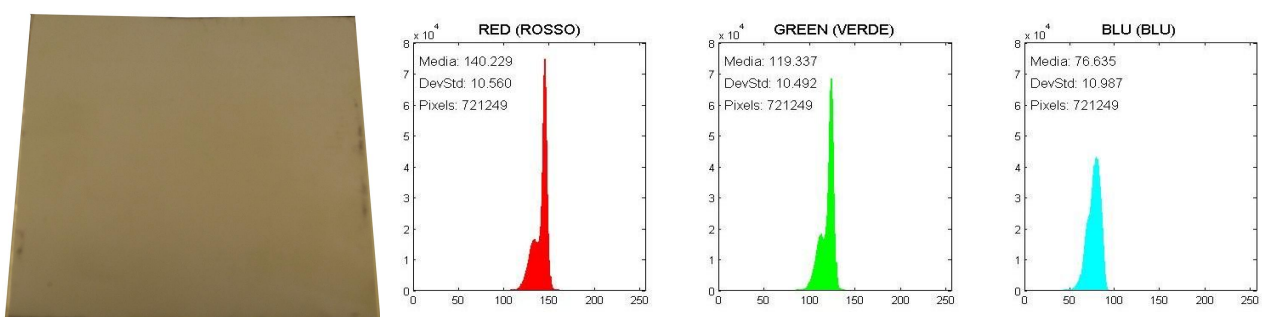


Fig. 4.159 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-A (campione 2).

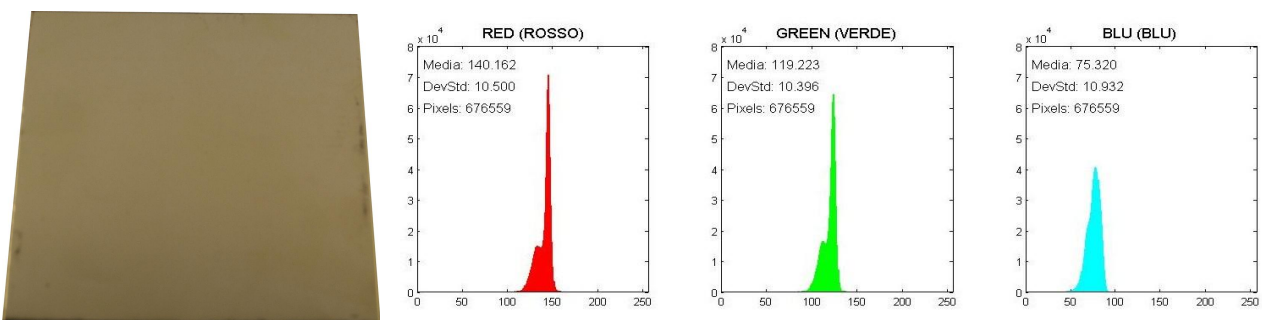


Fig. 4.160 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-A (campione 3).

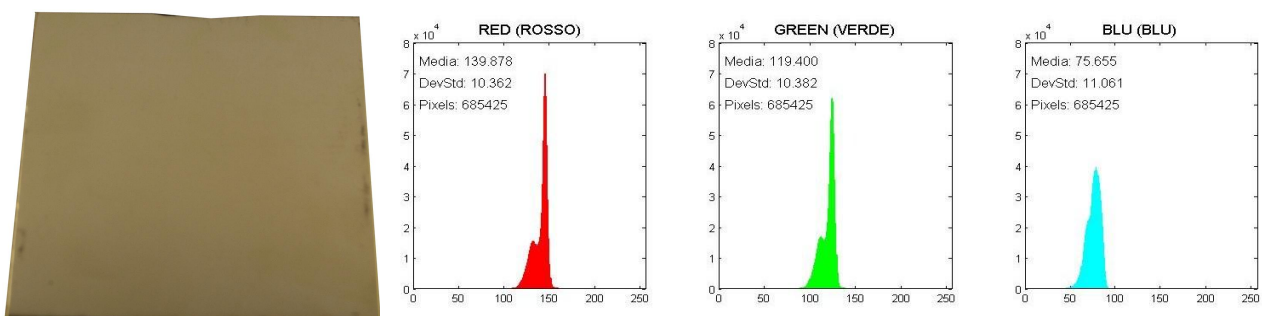


Fig. 4.161 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-A (campione 4).

# N-340-6-316-06-B:

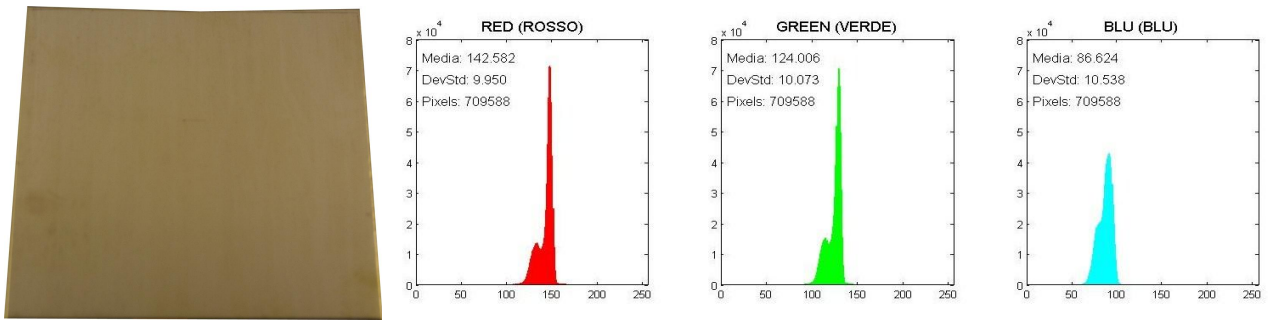


Fig. 4.162 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-B (campione 1).

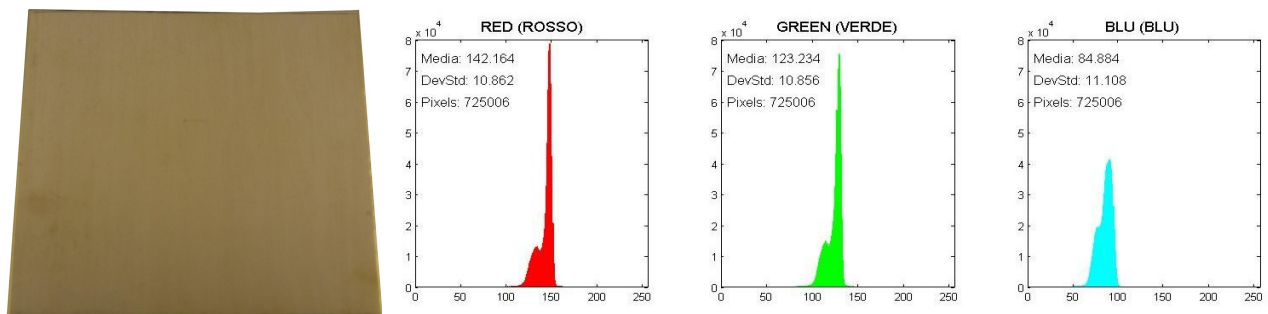


Fig. 4.163 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-B (campione 2).

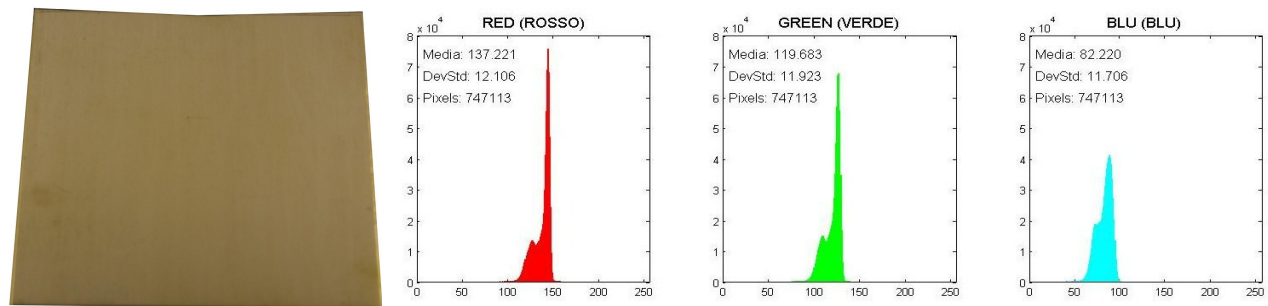


Fig. 4.164 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-B (campione 3).

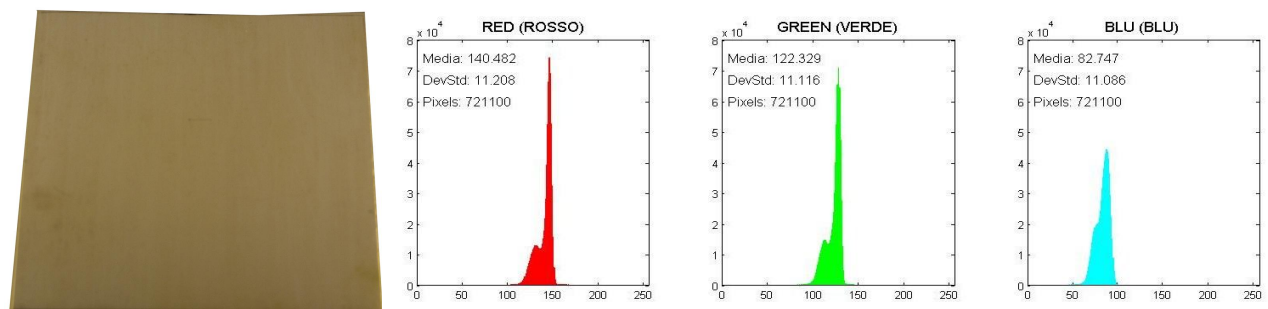


Fig. 4.165 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-340-6-316-06-B (campione 4).

# C-375-1-316-06-A:

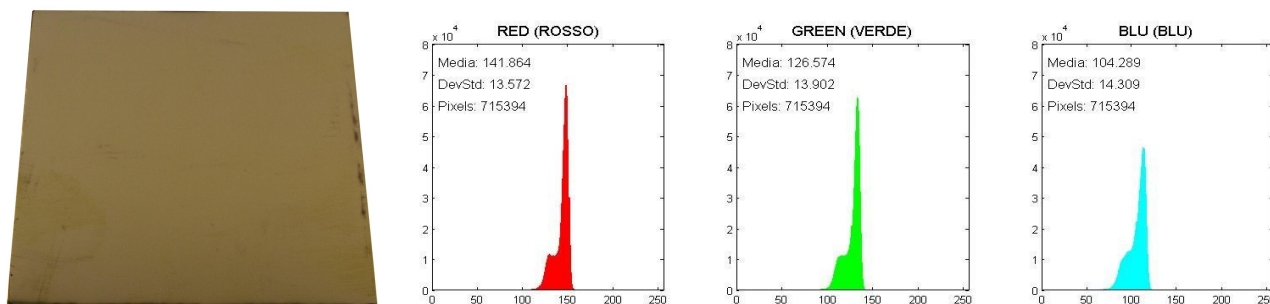


Fig. 4.166 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-A (campione 1).

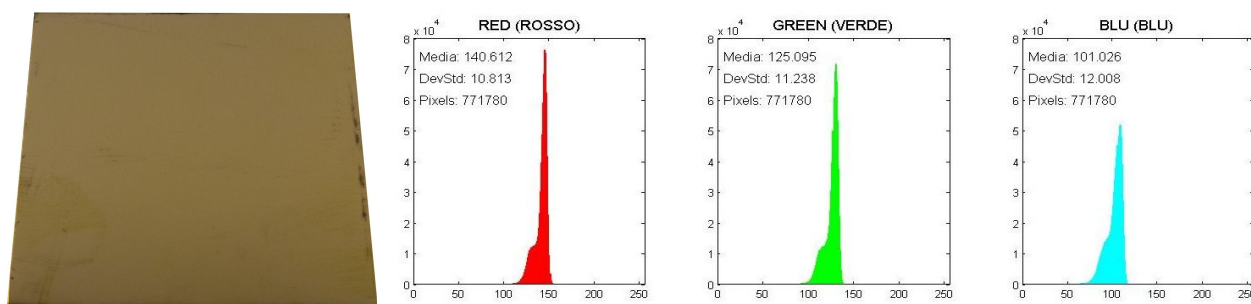


Fig. 4.167 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-A (campione 2).

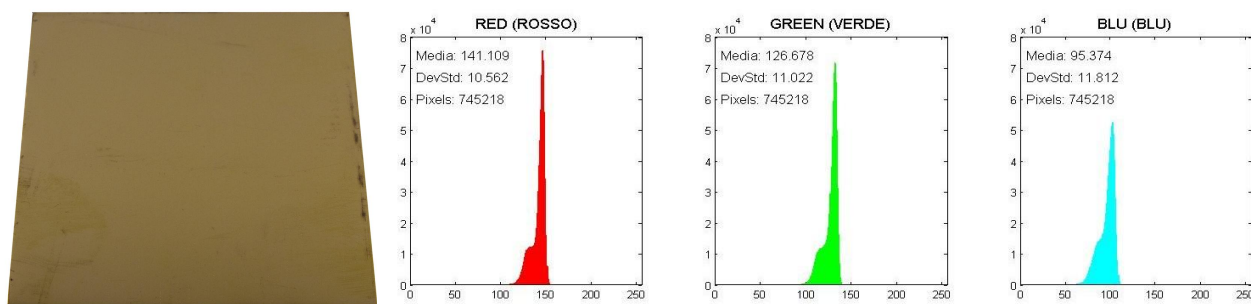


Fig. 4.168 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-A (campione 3).

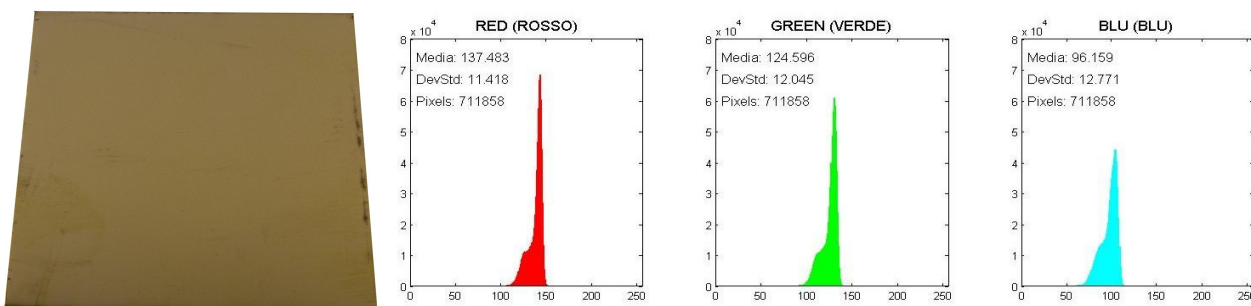


Fig. 4.169 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-A (campione 4).

## C-375-1-316-06-B:

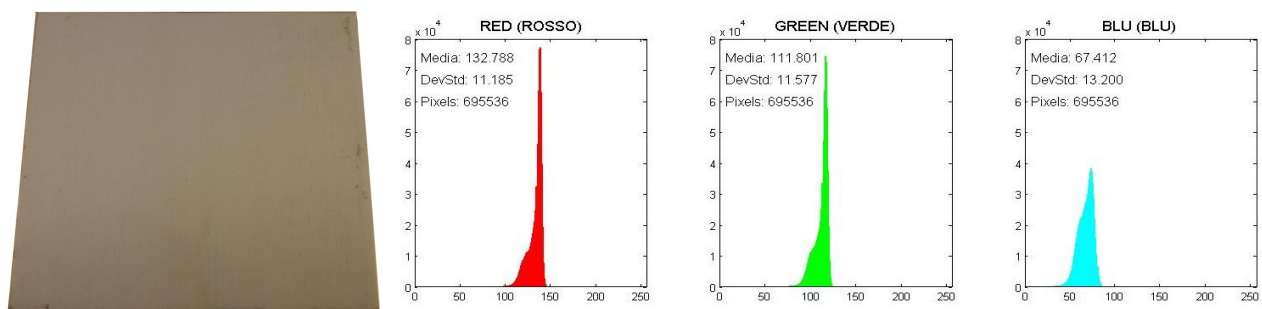


Fig. 4.170 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-B (campione 1).

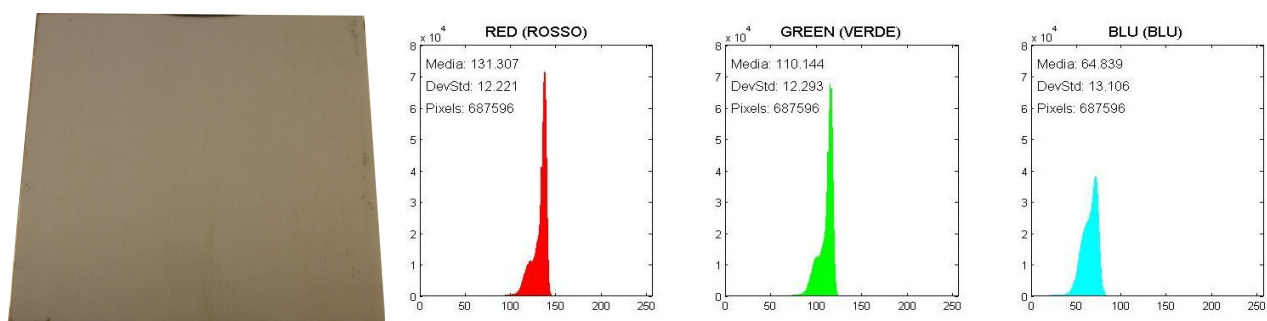


Fig. 4.171 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-B (campione 2).

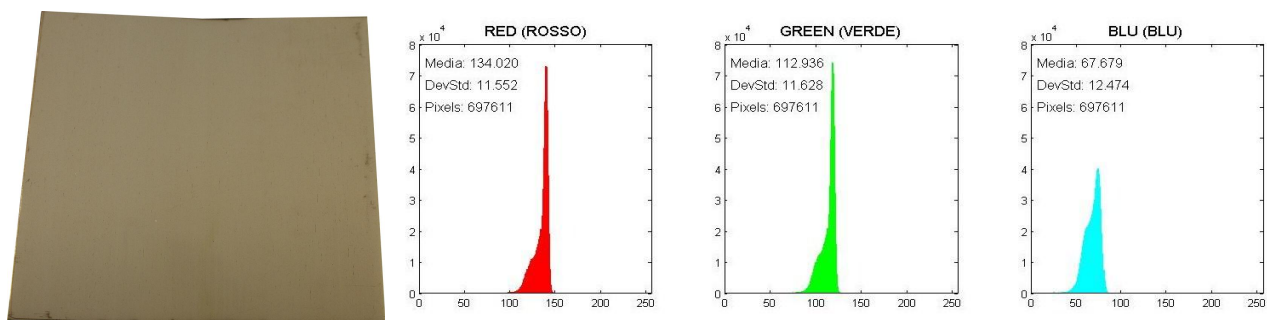


Fig. 4.172 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-B (campione 3).

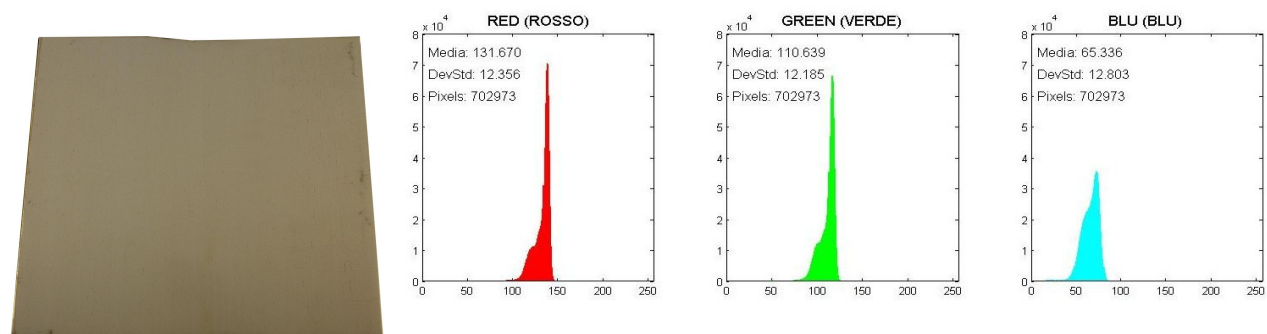


Fig. 4.173 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-1-316-06-B (campione 4).

# C-375-6-316-06-A:

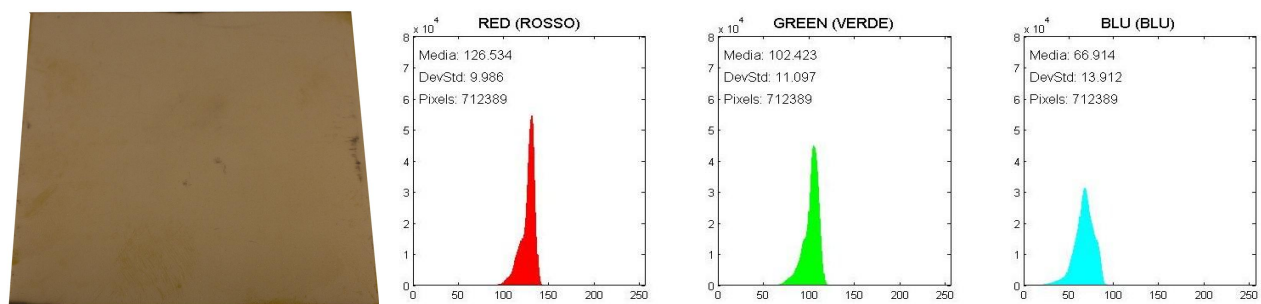


Fig. 4.174 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-A (campione 1).

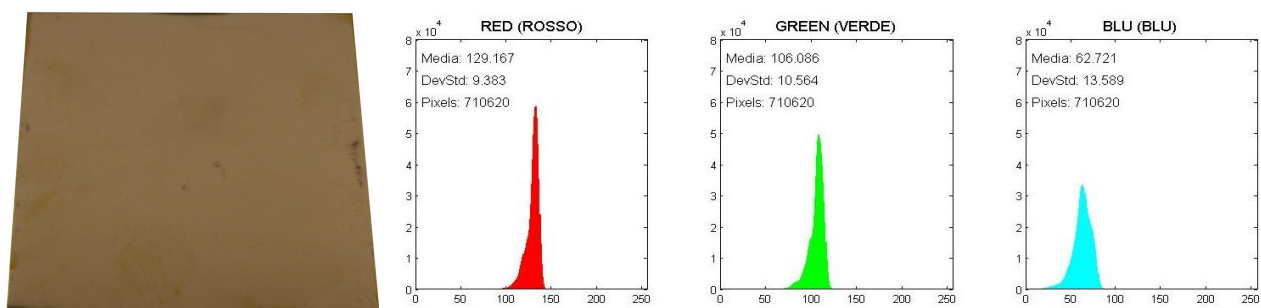


Fig. 4.175 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-A (campione 2).

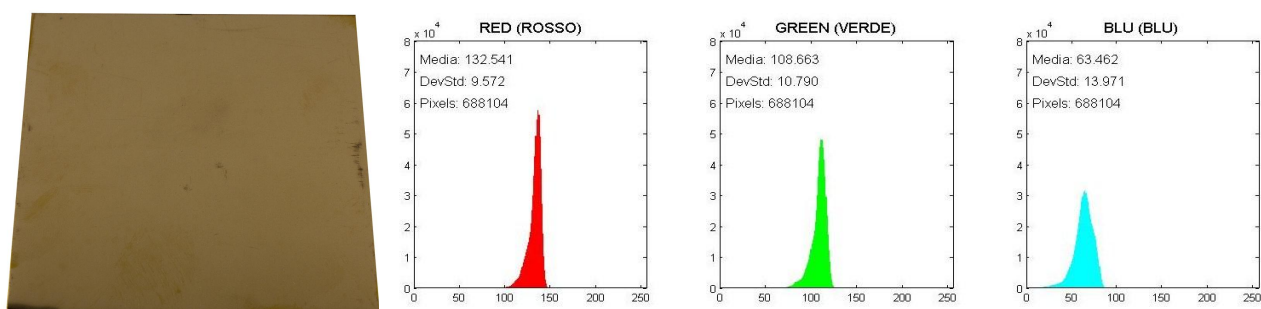


Fig. 4.176 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-A (campione 3).

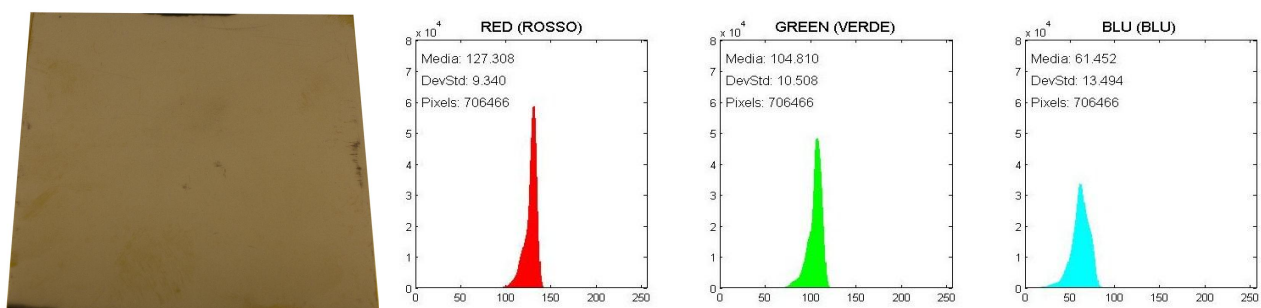


Fig. 4.177 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-A (campione 4).

# C-375-6-316-06-B:

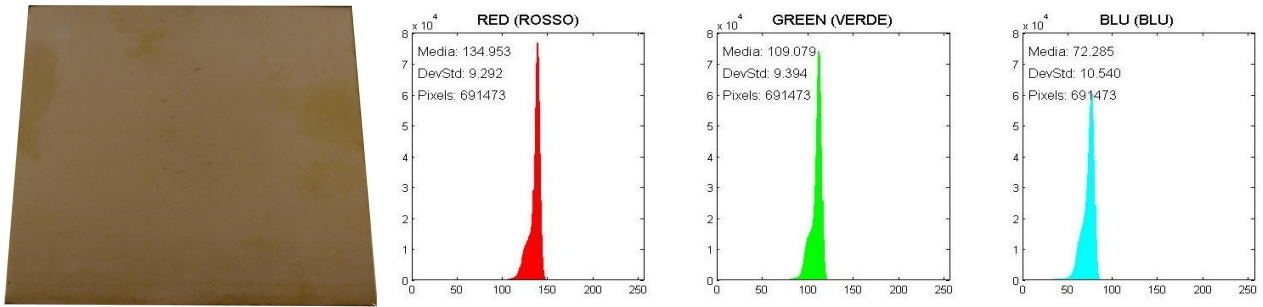


Fig. 4.178 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-B (campione 1).

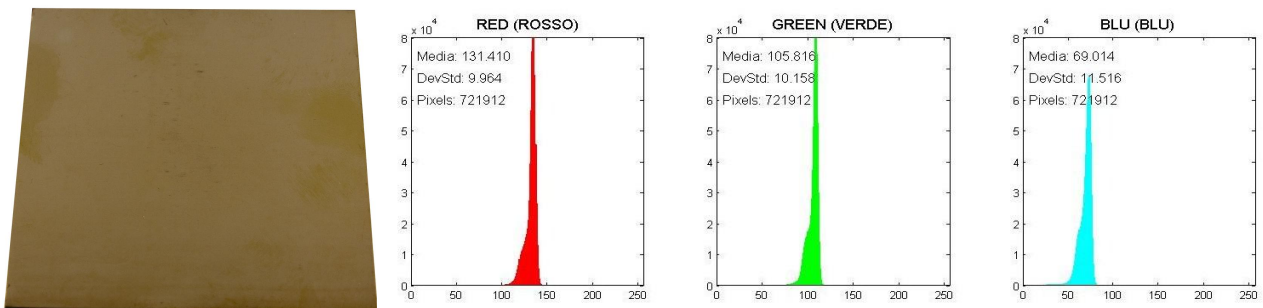


Fig. 4.179 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-B (campione 2).

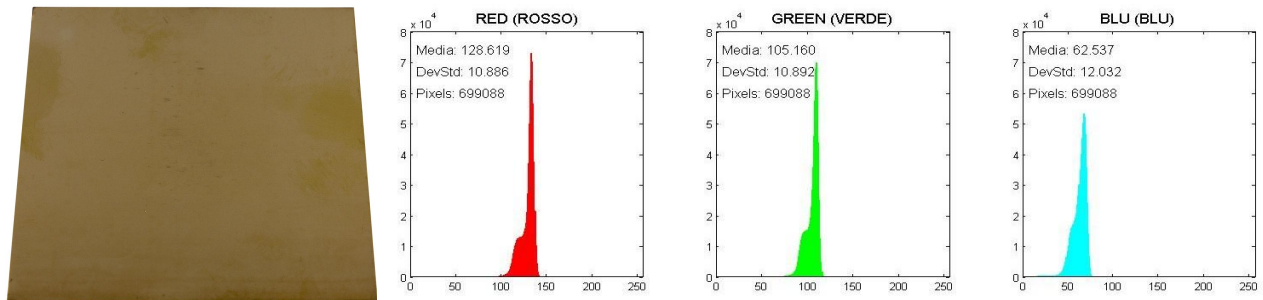


Fig. 4.180 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-B (campione 3).

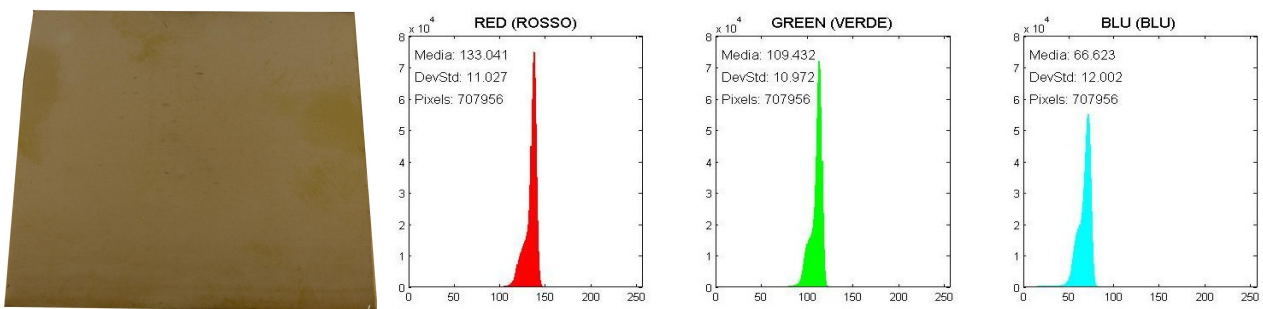


Fig. 4.181 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-375-6-316-06-B (campione 4).

# N-375-1-316-06-A:

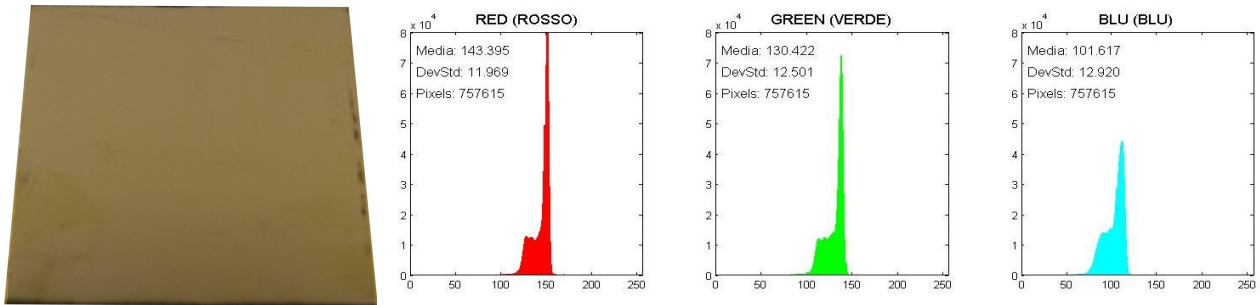


Fig. 4.182 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-1-316-06-A (campione 1).

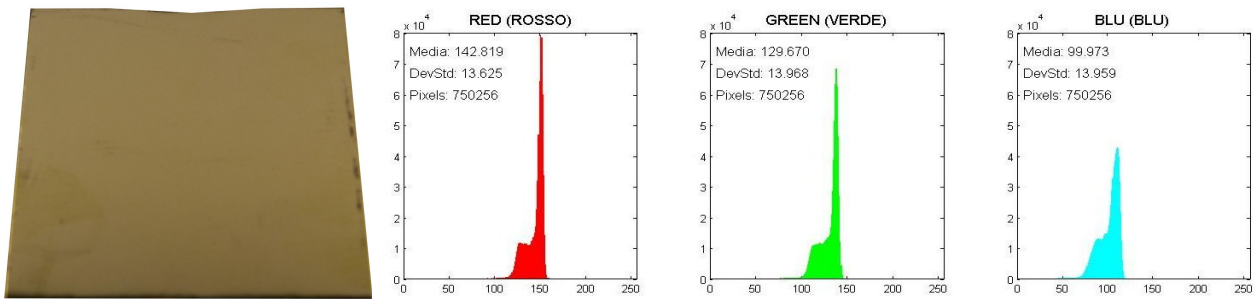


Fig. 4.183 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-1-316-06-A (campione 2).

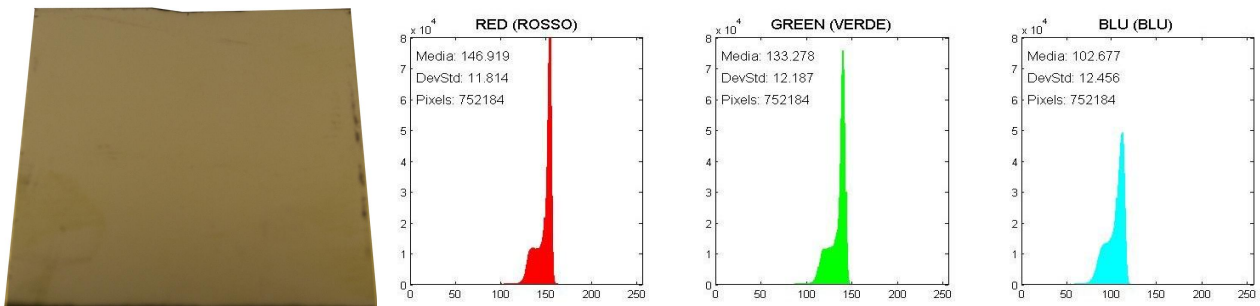


Fig. 4.184 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-1-316-06-A (campione 3).

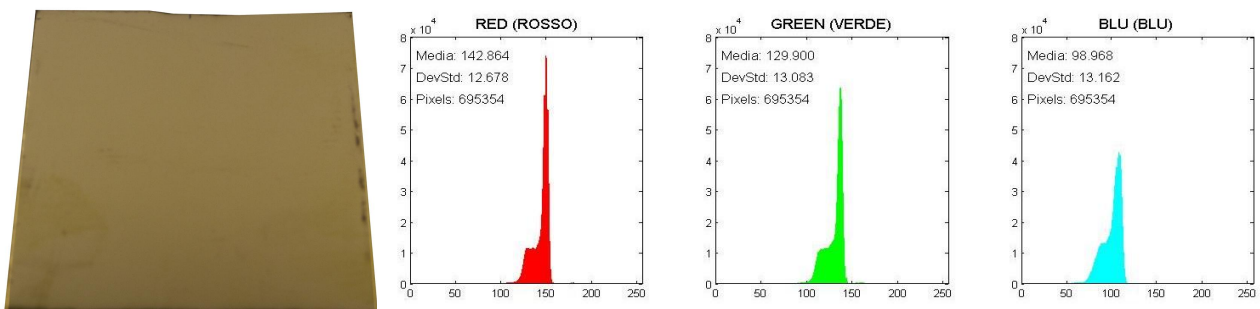


Fig. 4.185 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-1-316-06-A (campione 4).



# N-375-1-316-06-B:

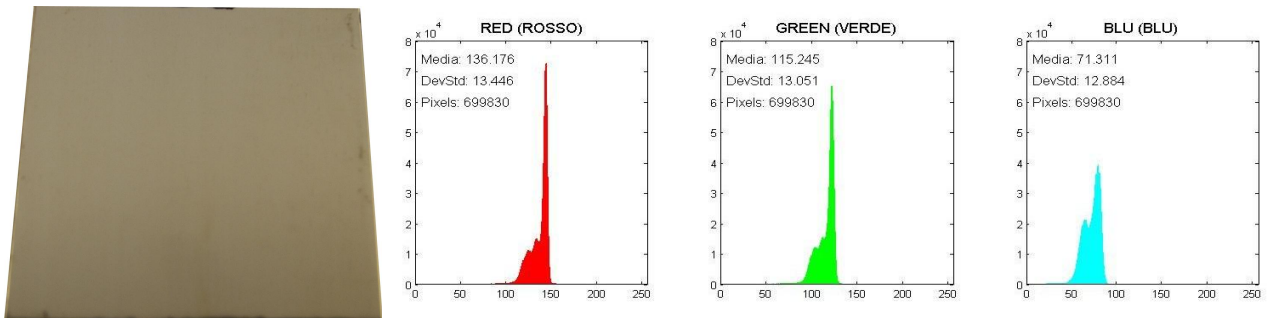


Fig. 4.186 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-1-316-06-B (campione 1).

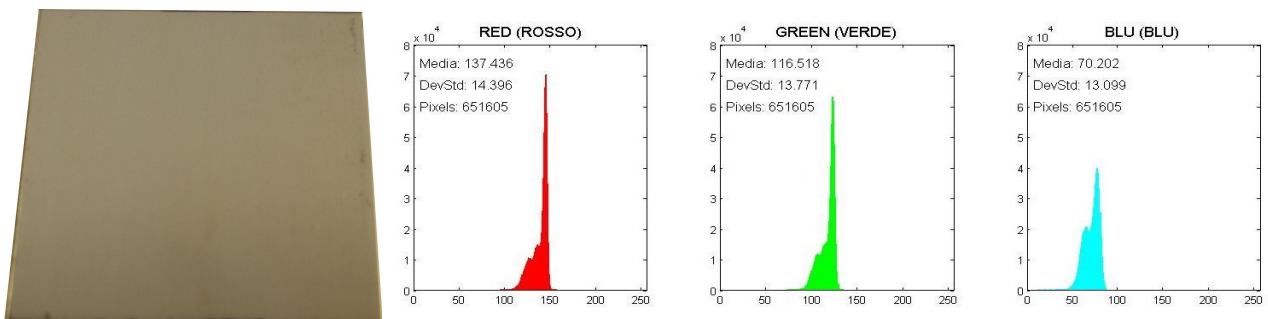


Fig. 4.187 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB (campione 2).

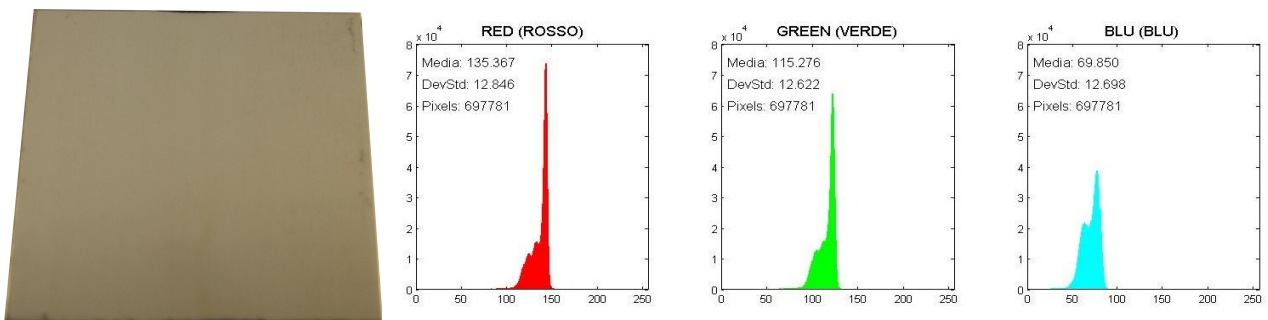


Fig. 4.188 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-1-316-06-B (campione 3).

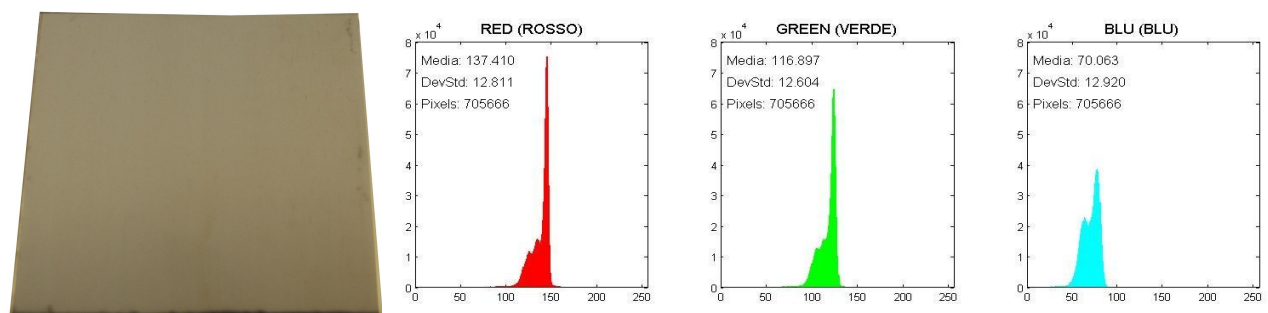


Fig. 4.189 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-1-316-06-B (campione 4).

# N-375-6-316-06-A:

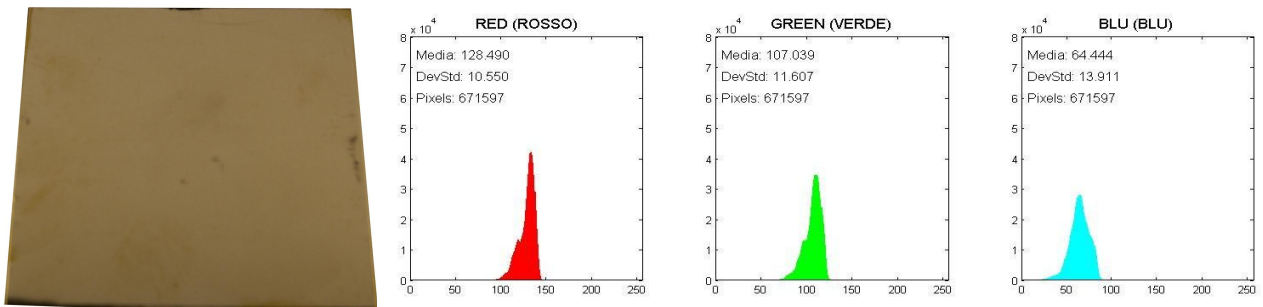


Fig. 4.190 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-A (campione 1).

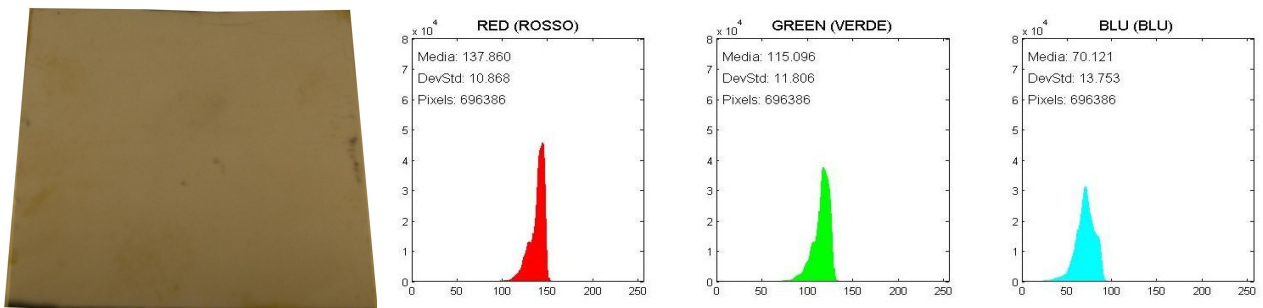


Fig. 4.191 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-A (campione 2).

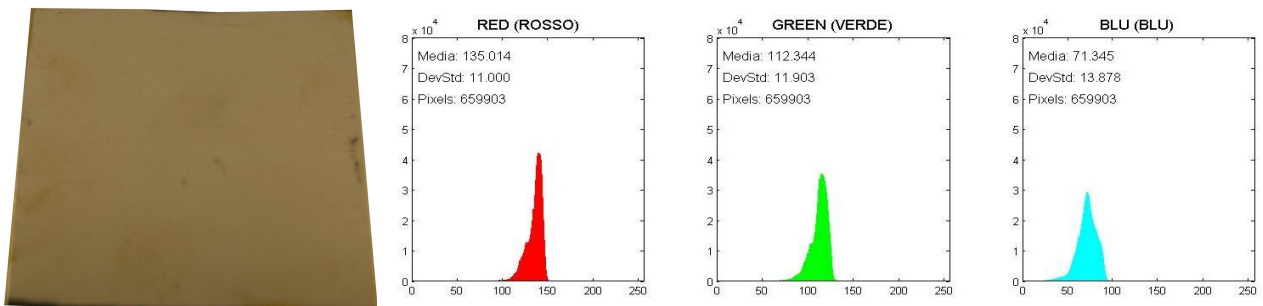


Fig. 4.192 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-A (campione 3).

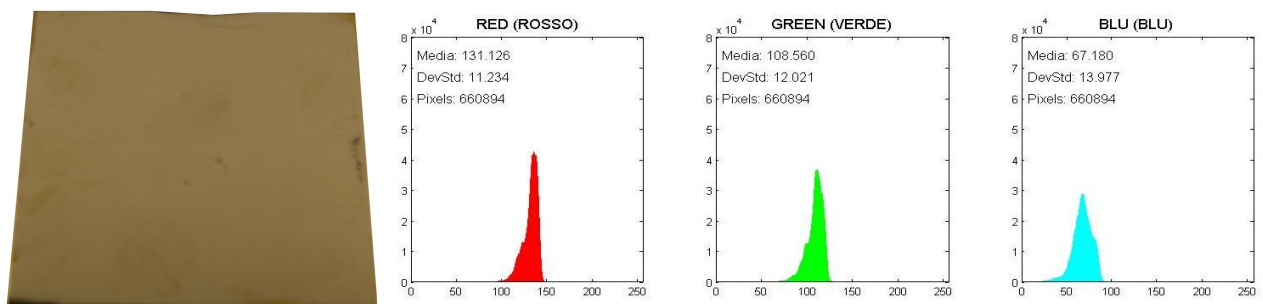


Fig. 4.193 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-A (campione 4).

# N-375-6-316-06-B:

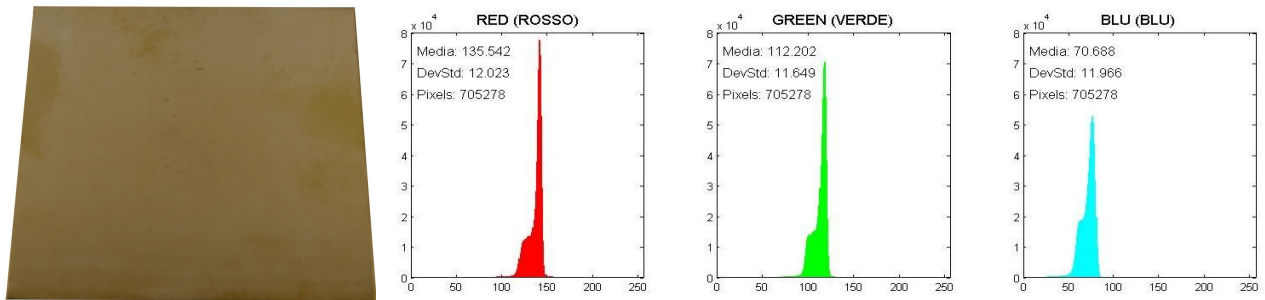


Fig. 4.194 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-B (campione 1).

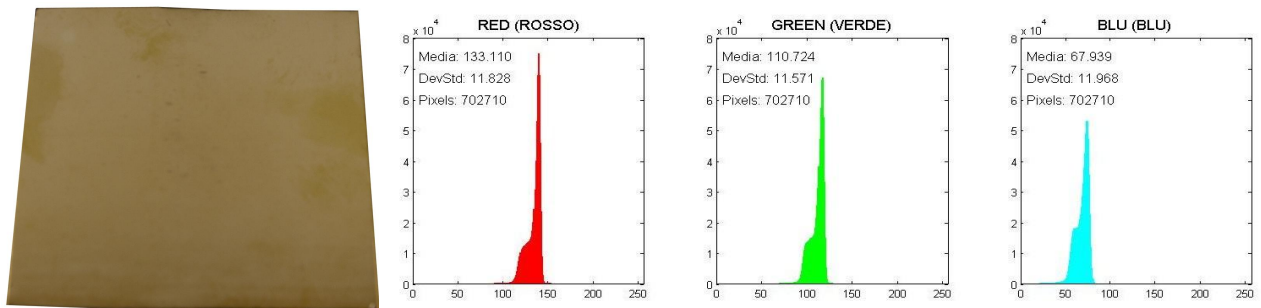


Fig. 4.195 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-B (campione 2).

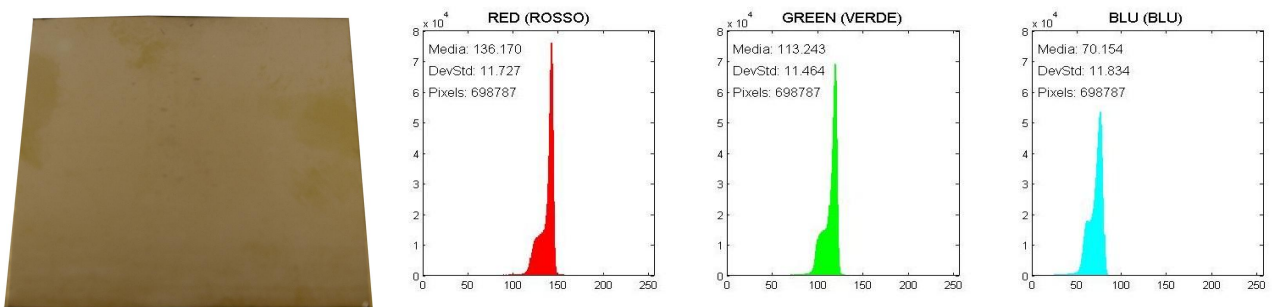


Fig. 4.196 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-B (campione 3).

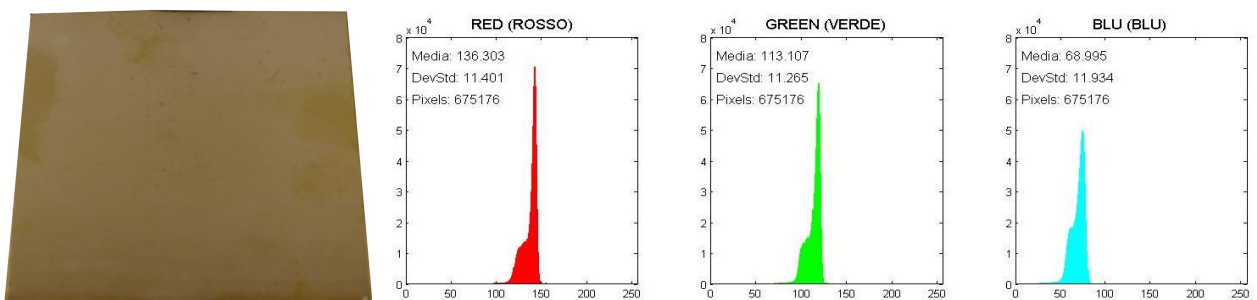


Fig. 4.197 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-375-6-316-06-B (campione 4).

# C-415-1-316-06-A:

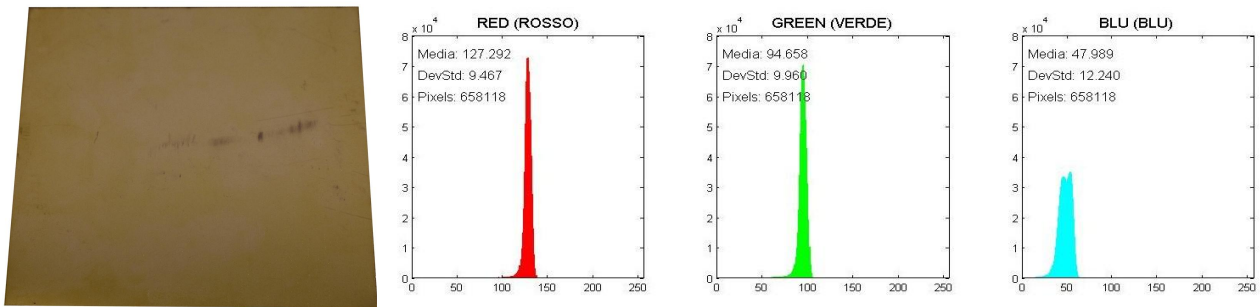


Fig. 4.198 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-A (campione 1).

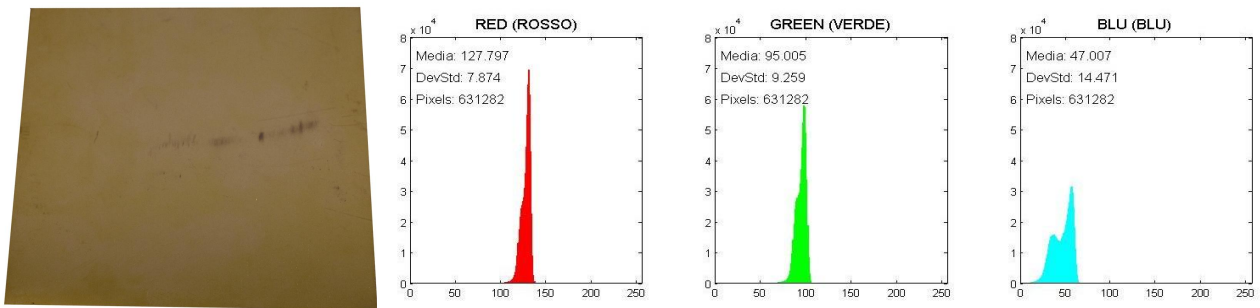


Fig. 4.199 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-A (campione 2).

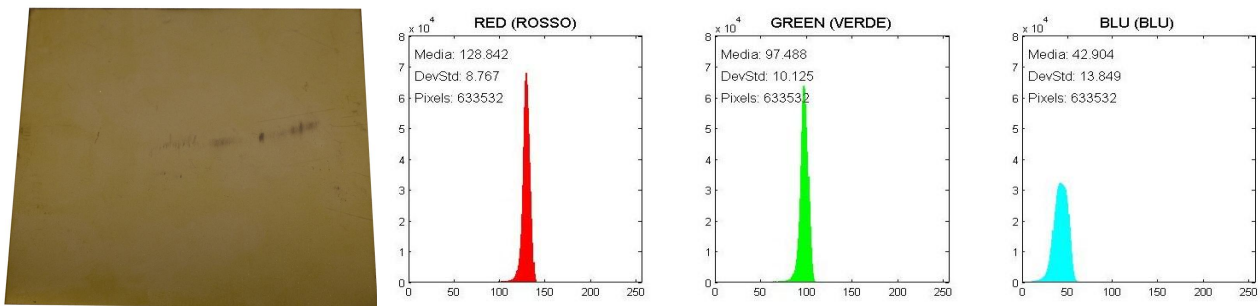


Fig. 4.200 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-A (campione 3).

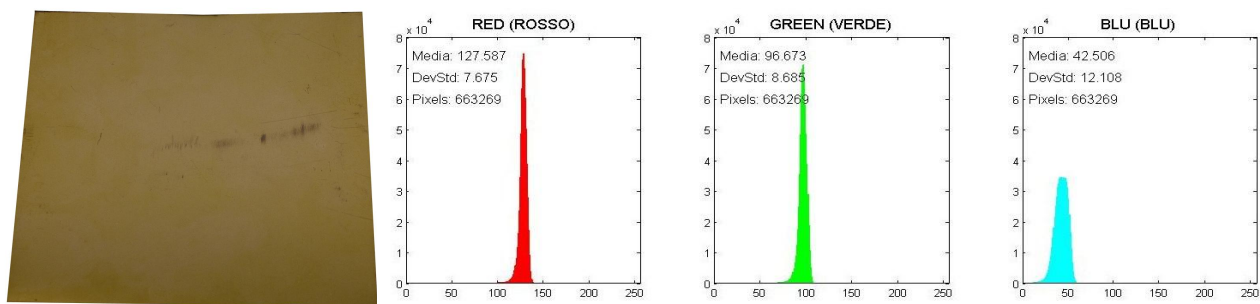


Fig. 4.201 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-A (campione 4).

## C-415-1-316-06-B:

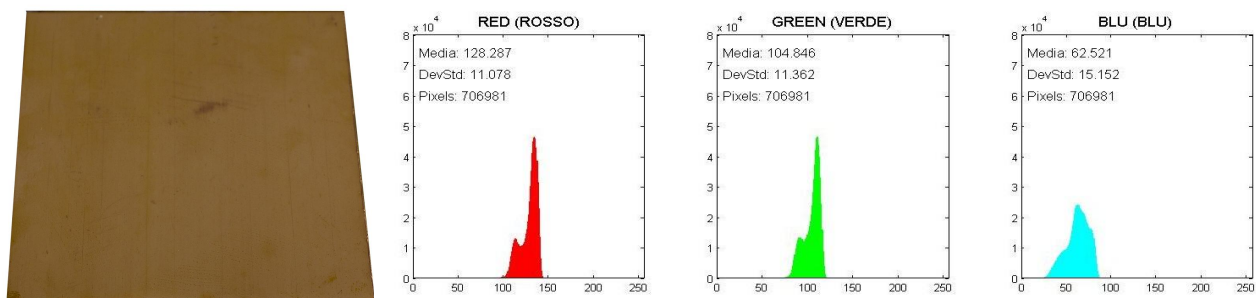


Fig. 4.202 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-B (campione 1).

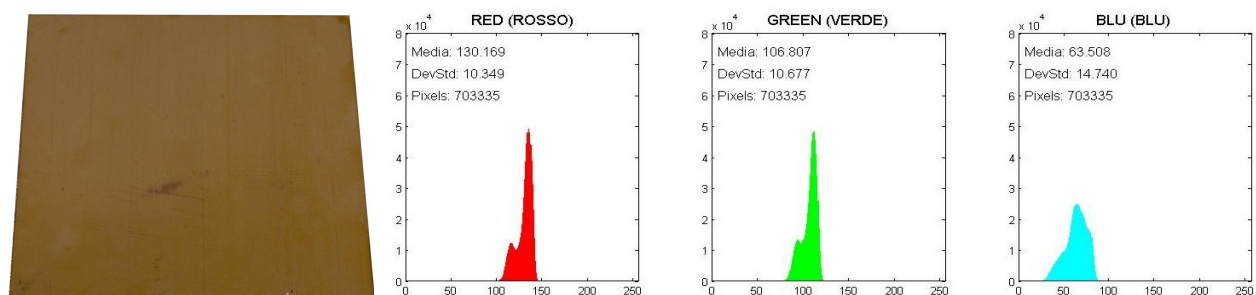


Fig. 4.203 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-B (campione 2).

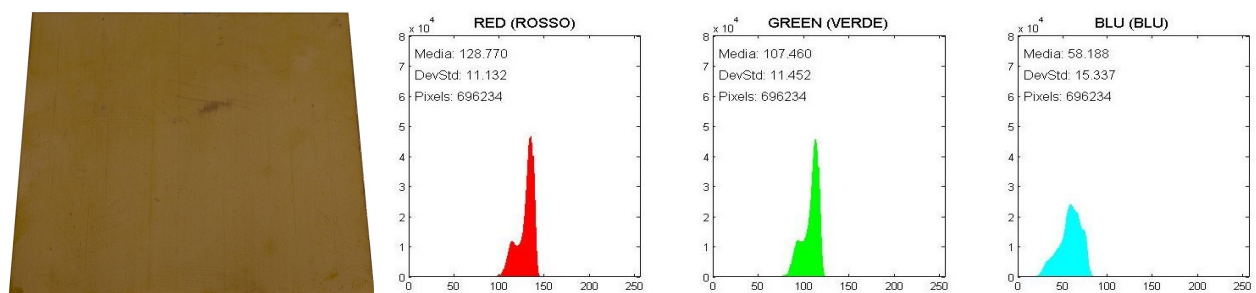


Fig. 4.204 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-B (campione 3).

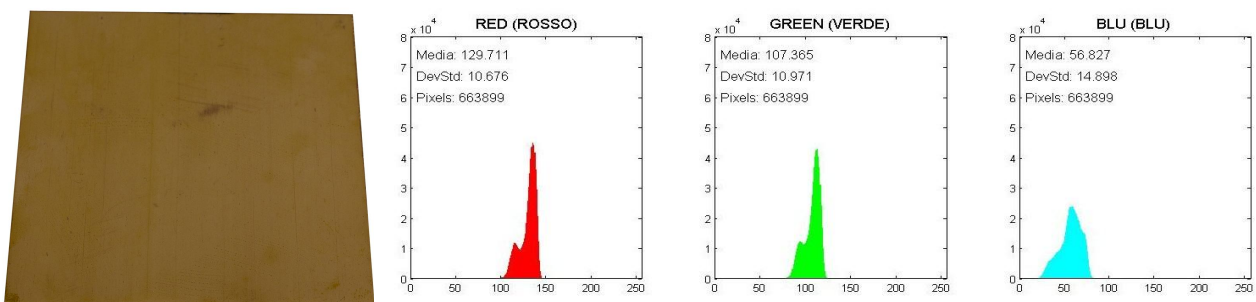


Fig. 4.205 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-1-316-06-B (campione 4).

# C-415-6-316-06-A:

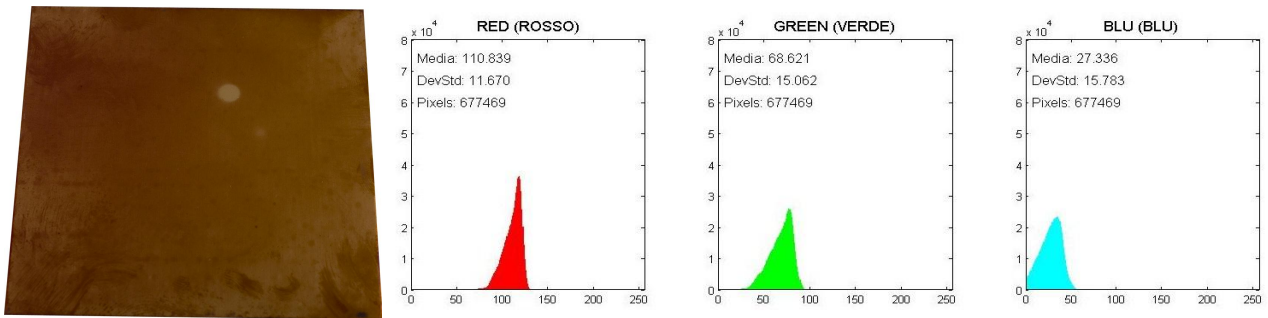


Fig. 4.206 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-A (campione 1).

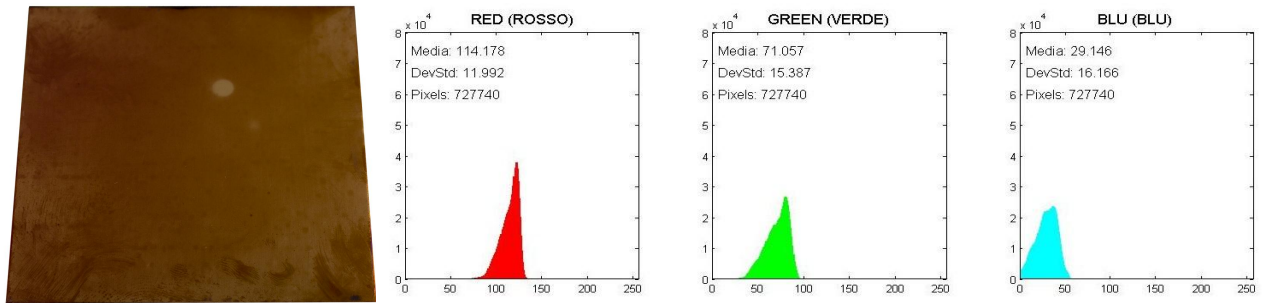


Fig. 4.207 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-A (campione 2).

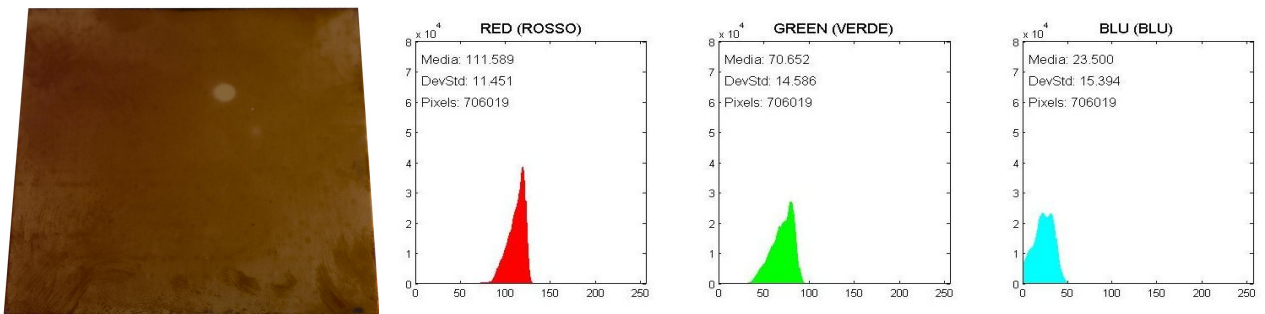


Fig. 4.208 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-A (campione 3).

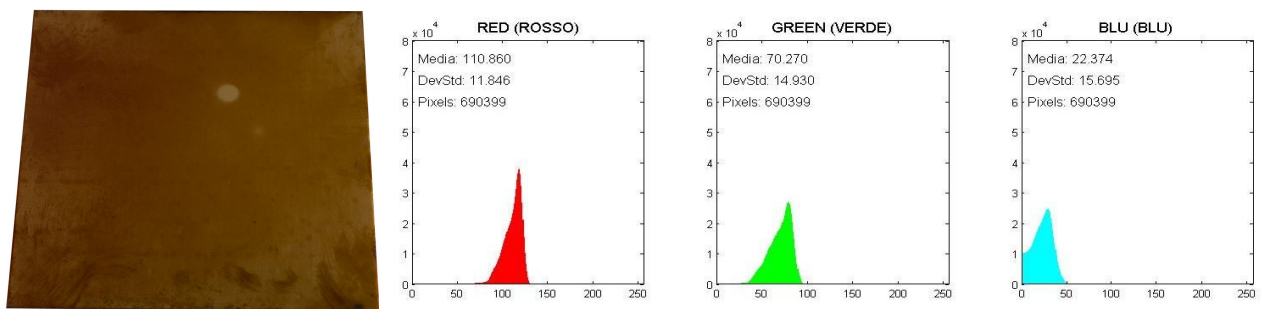


Fig. 4.209 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-A (campione 4).

## C-415-6-316-06-B:

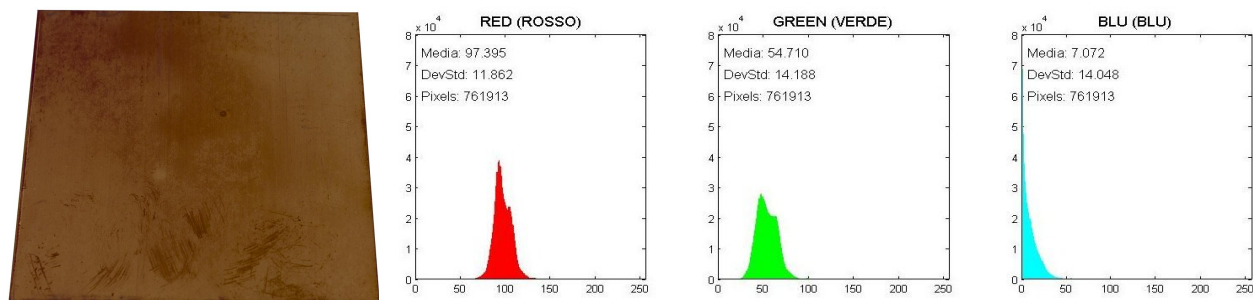


Fig. 4.210 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-B (campione 1).

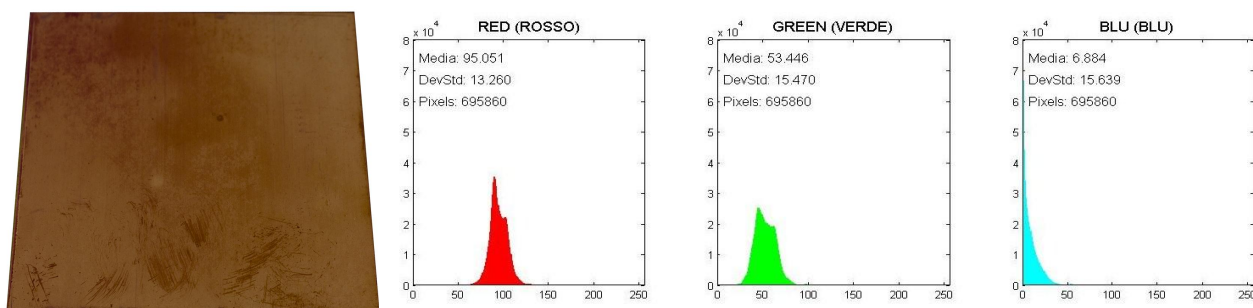


Fig. 4.211 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-B (campione 2).

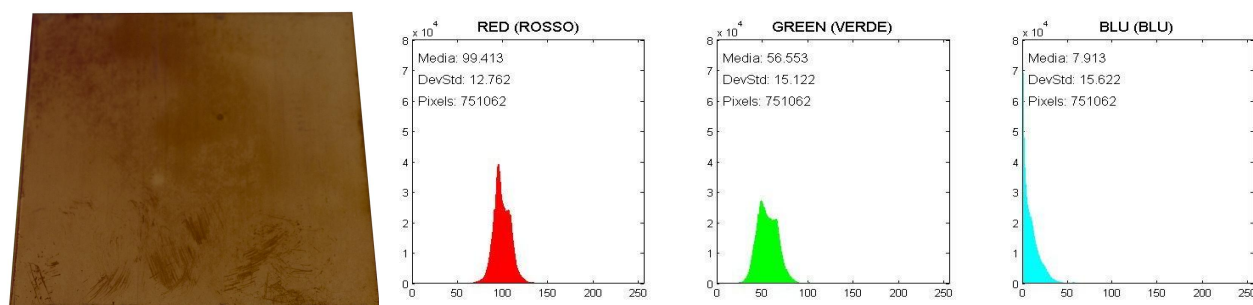


Fig. 4.212 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-B (campione 3).

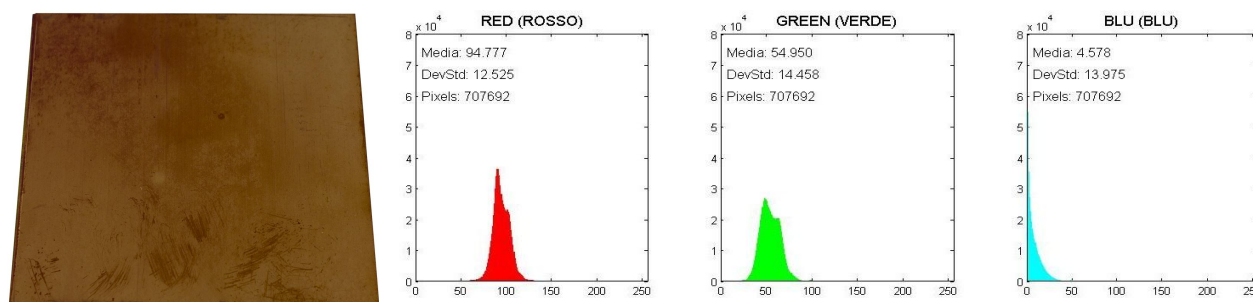


Fig. 4.213 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-415-6-316-06-B (campione 4).

# N-415-1-316-06-A:

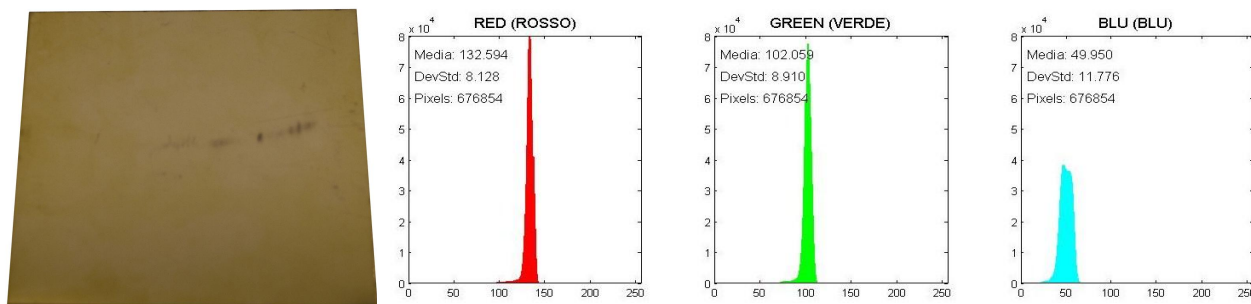


Fig. 4.214 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-A (campione 1).

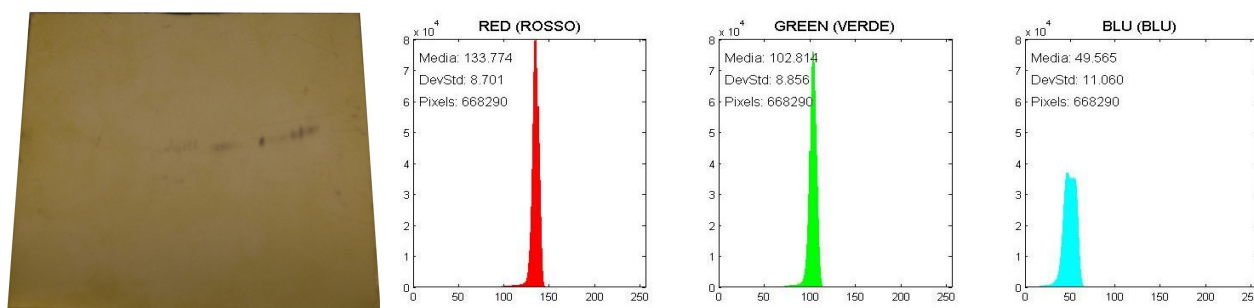


Fig. 4.215 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-A (campione 2).

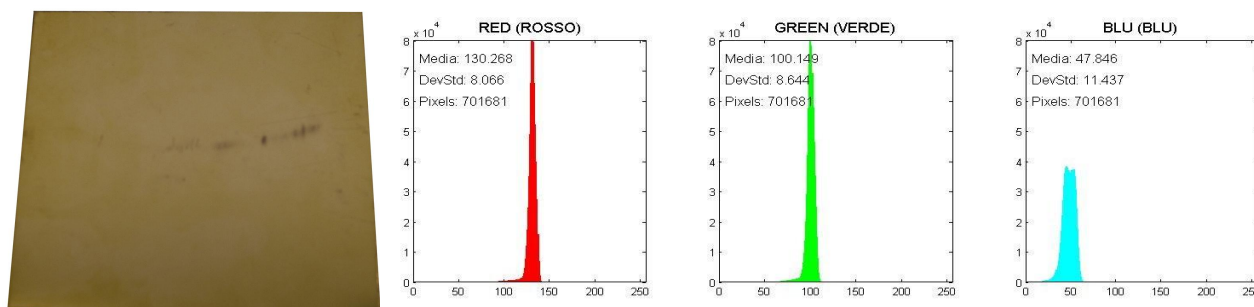


Fig. 4.216 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-A (campione 3).

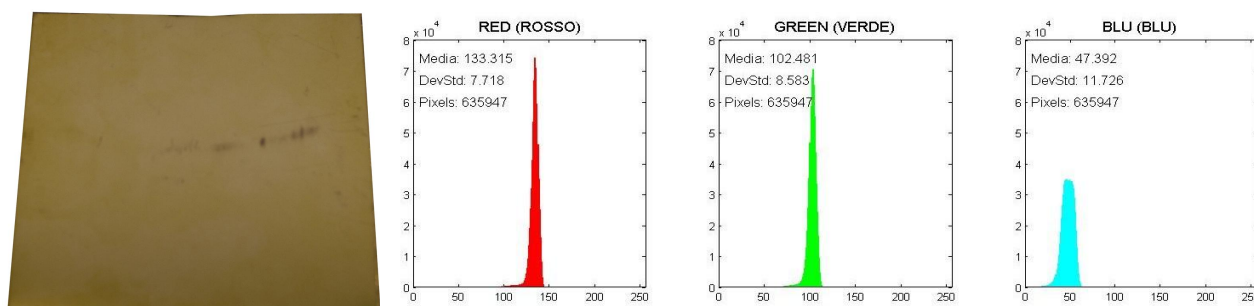


Fig. 4.217 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-A (campione 4).



# N-415-1-316-06-B:

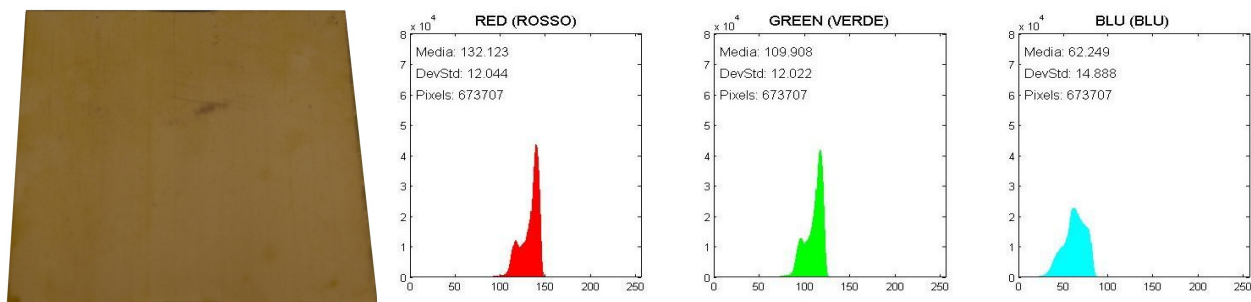


Fig. 4.218 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-B (campione 1).

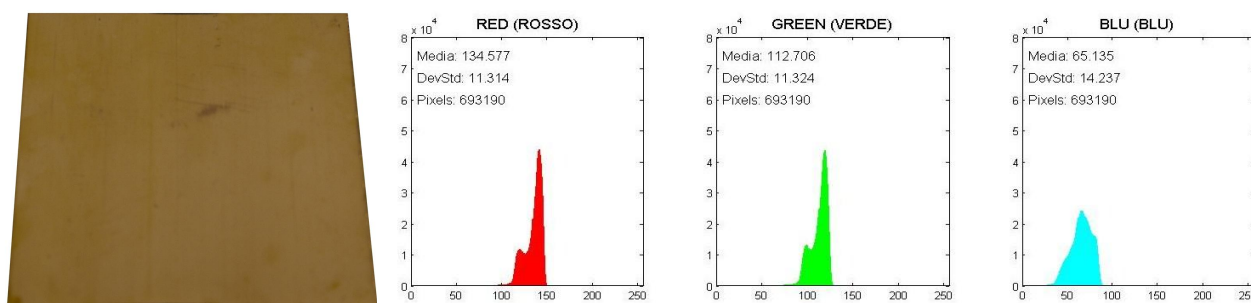


Fig. 4.219 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-B (campione 2).

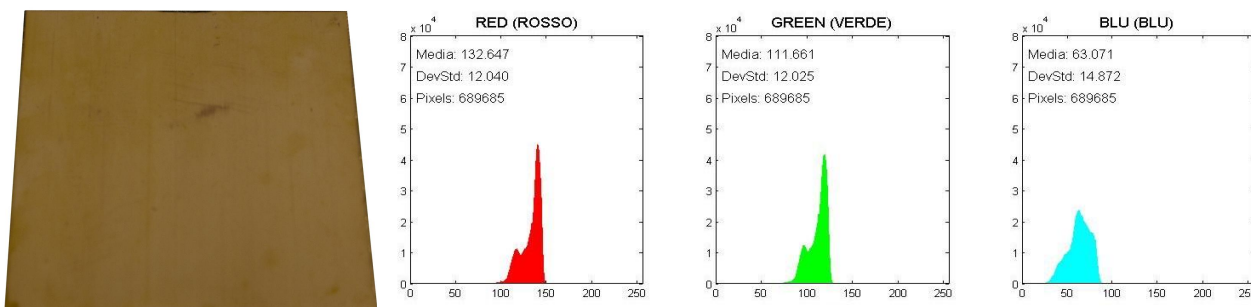


Fig. 4.220 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-B (campione 3).

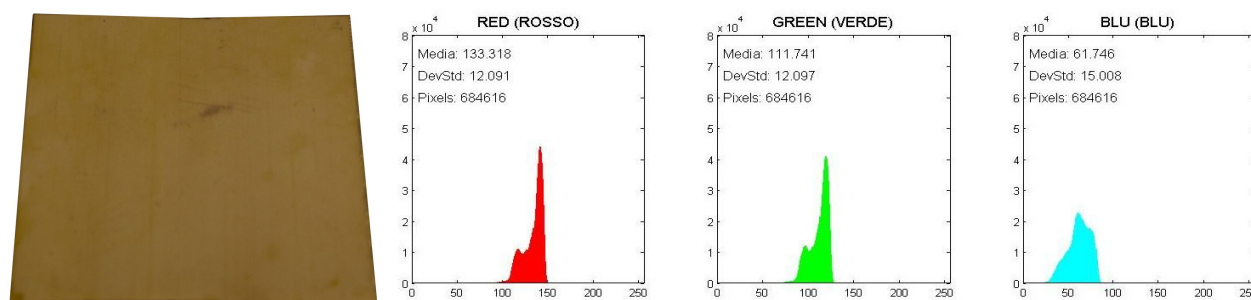


Fig. 4.221 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-1-316-06-B (campione 4).

# N-415-6-316-06-A:

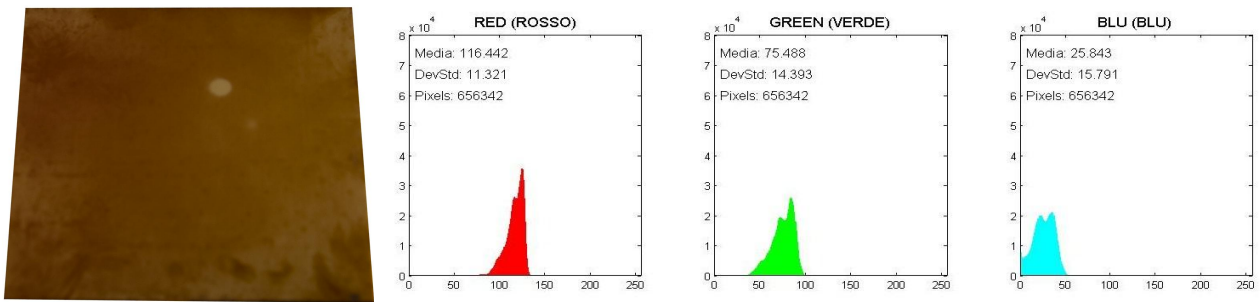


Fig. 4.222 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-A (campione 1).

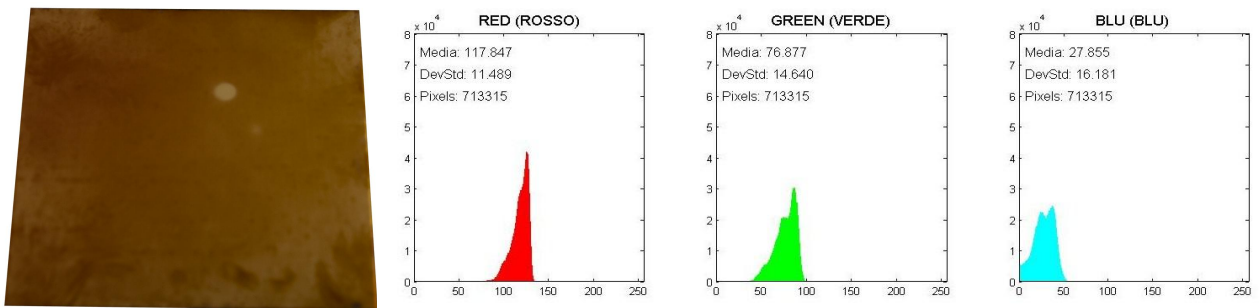


Fig. 4.223 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-A (campione 2).

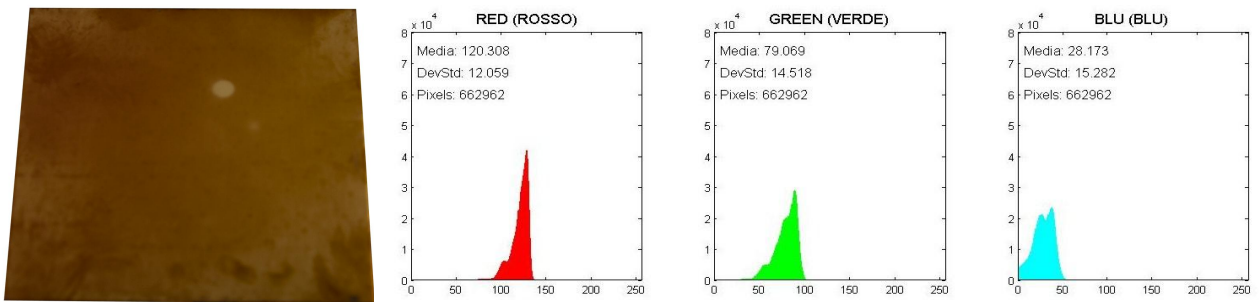


Fig. 4.224 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-A (campione 3).

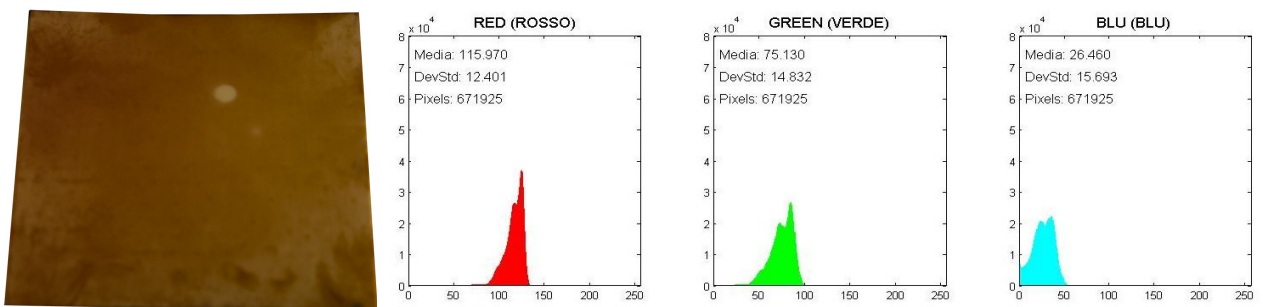


Fig. 4.225 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-A (campione 4).

# N-415-6-316-06-B:

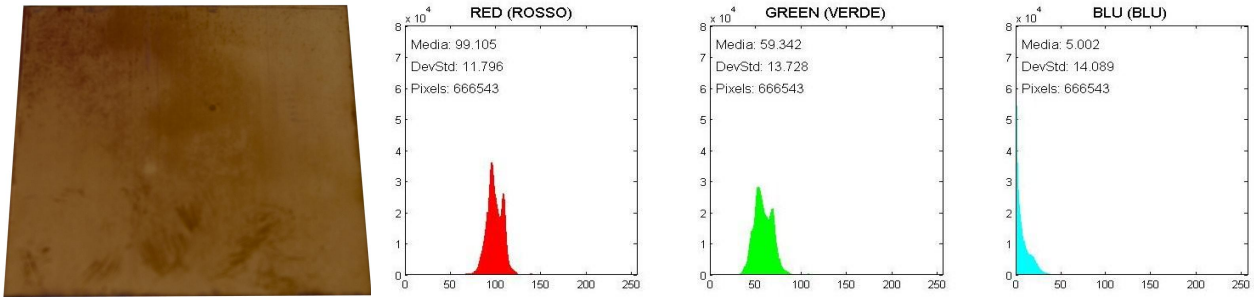


Fig. 4.226 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-B (campione 1).

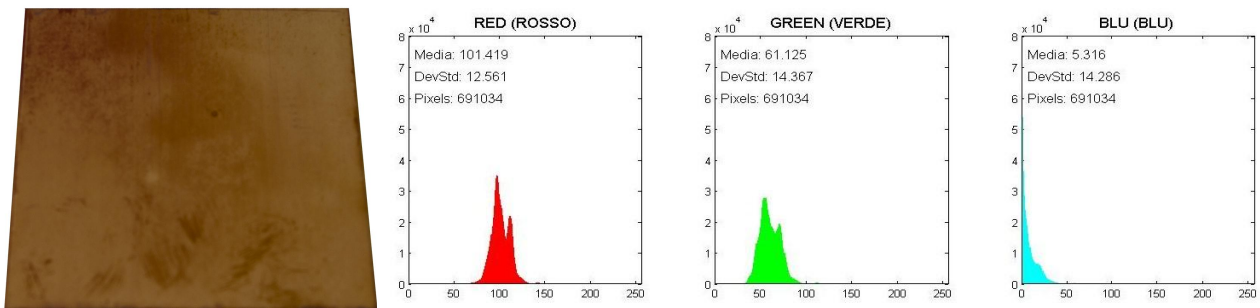


Fig. 4.227 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-B (campione 2).

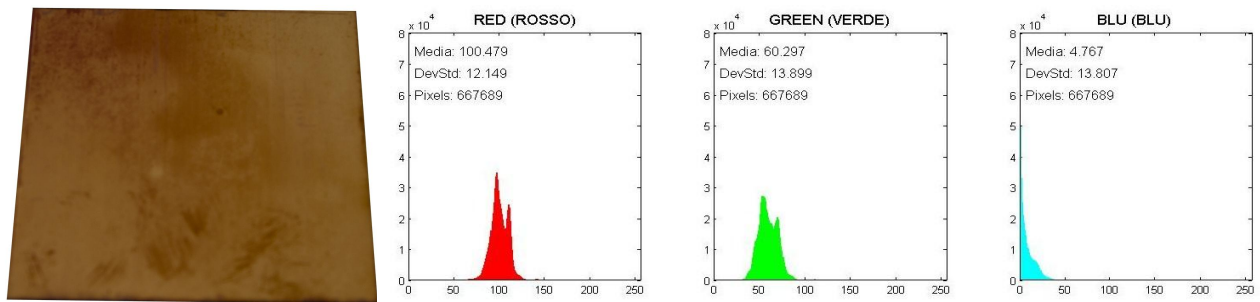


Fig. 4.228 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-B (campione 3).

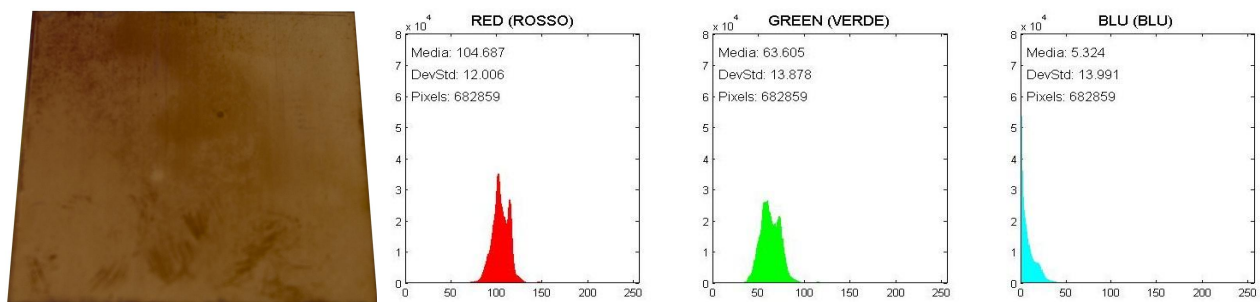


Fig. 4.229 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-415-6-316-06-B (campione 4).

# C-450-1-316-06-A:

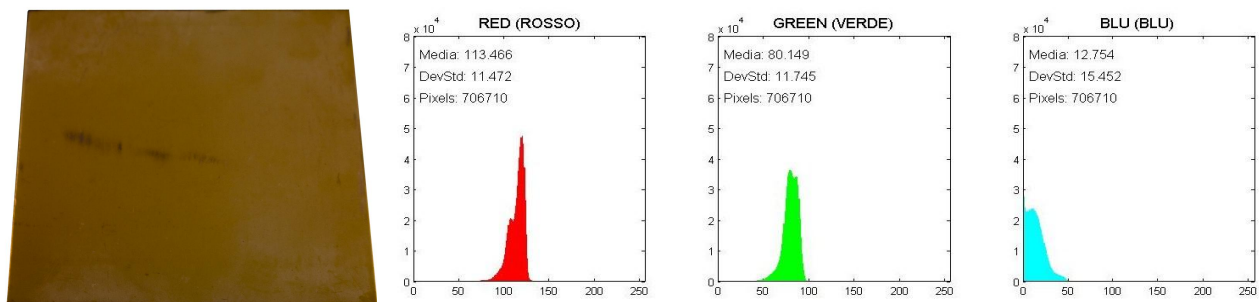


Fig. 4.230 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-A (campione 1).

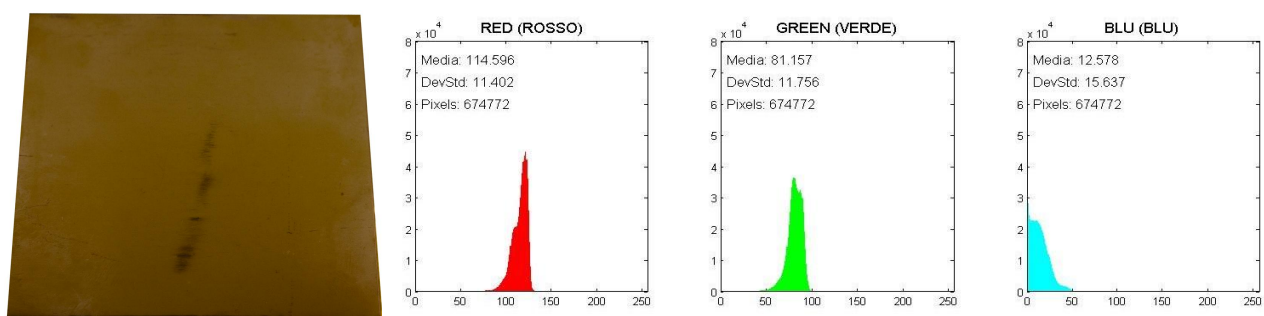


Fig. 4.231 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-A (campione 2).

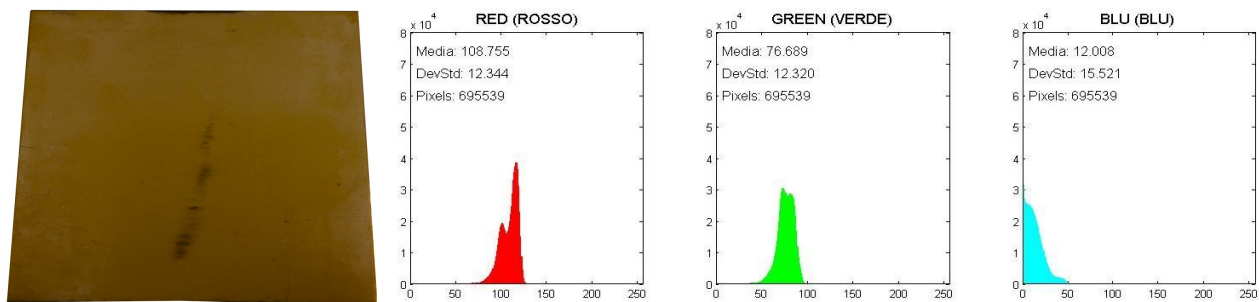


Fig. 4.232 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-A (campione 3).

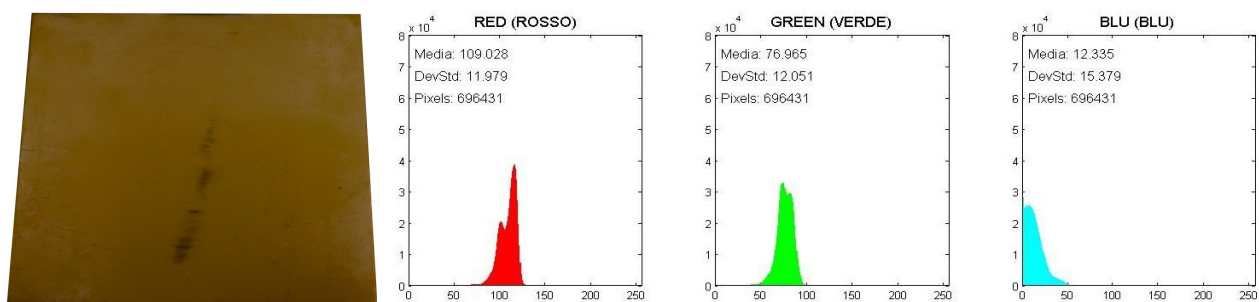


Fig. 4.233 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-A (campione 4).

# C-450-1-316-06-B:

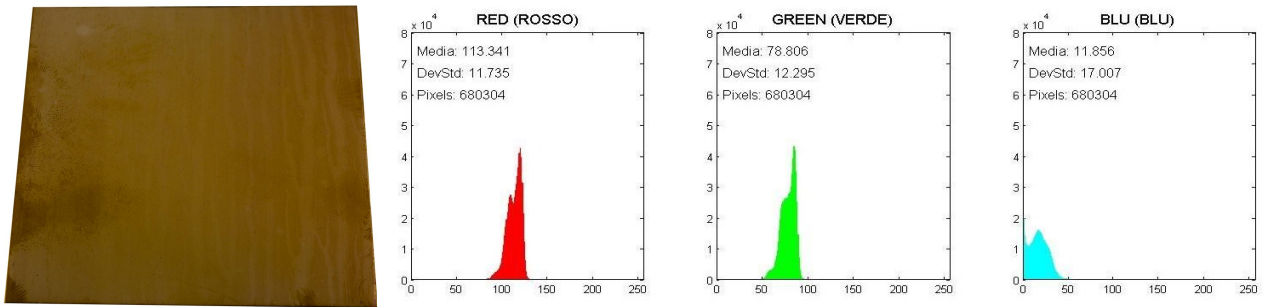


Fig. 4.234 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-B (campione 1).

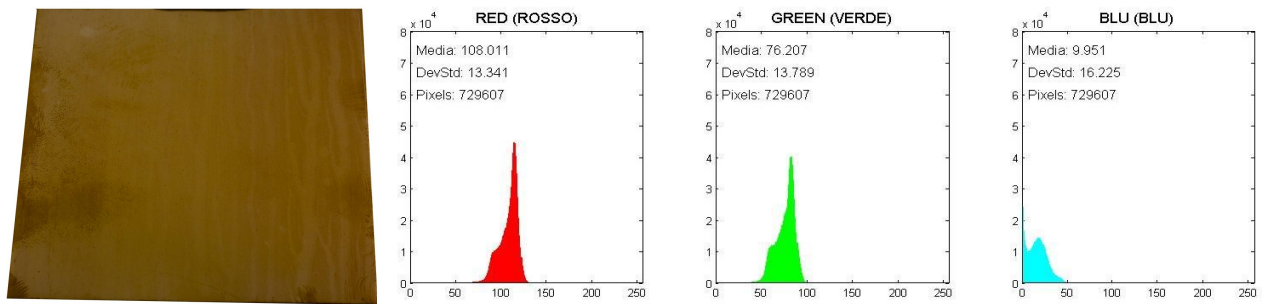


Fig. 4.235 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-B (campione 2).

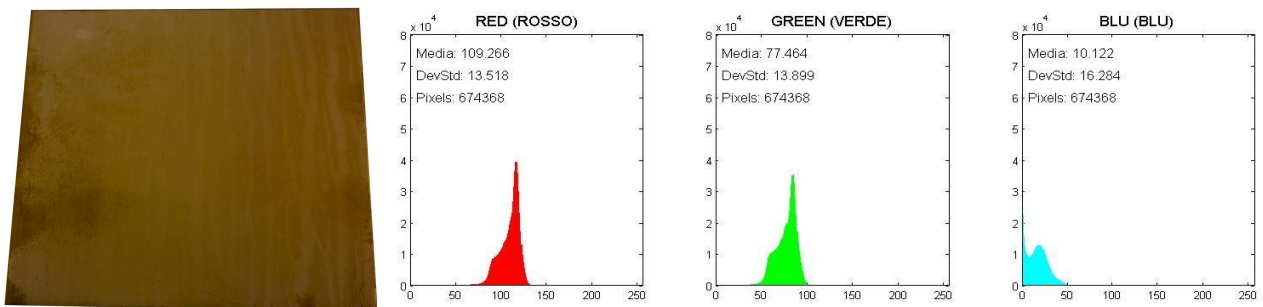


Fig. 4.236 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-B (campione 3).

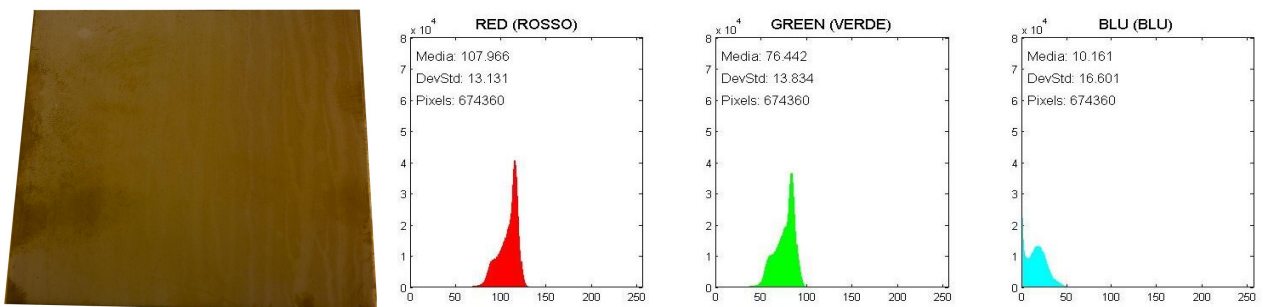


Fig. 4.237 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-1-316-06-B (campione 4).

# C-450-6-316-06-A:

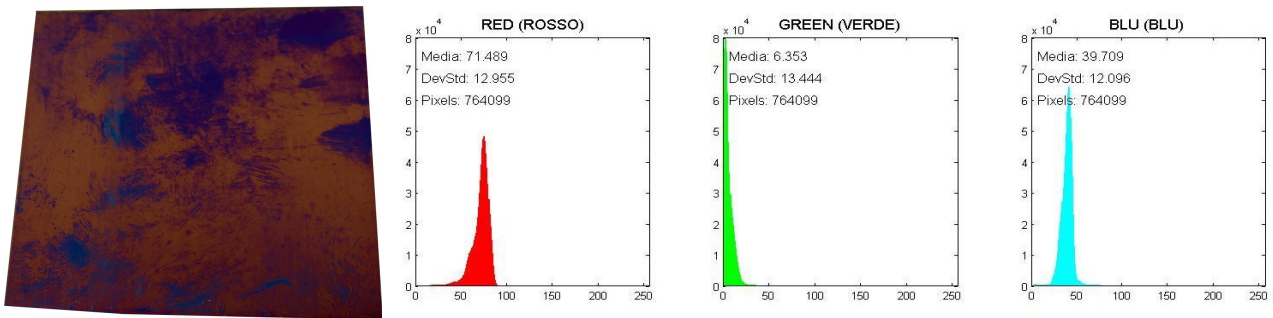


Fig. 4.238 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-A (campione 1).

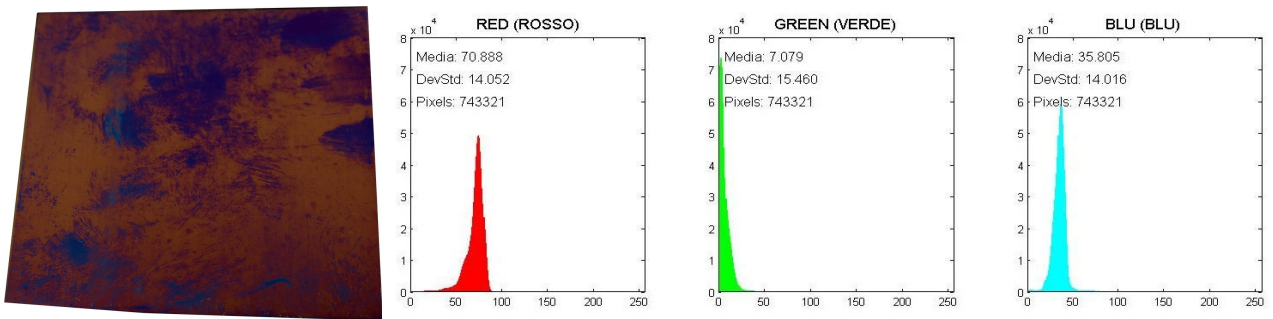


Fig. 4.239 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-A (campione 2).

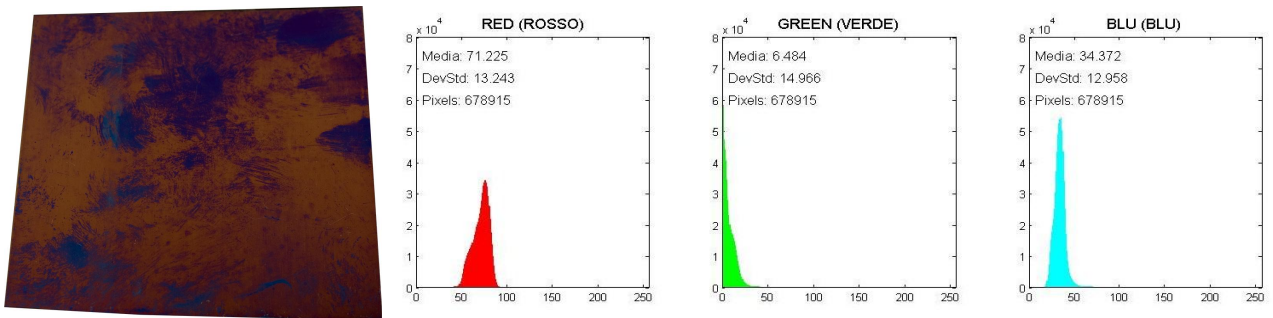


Fig. 4.240 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-A (campione 3).

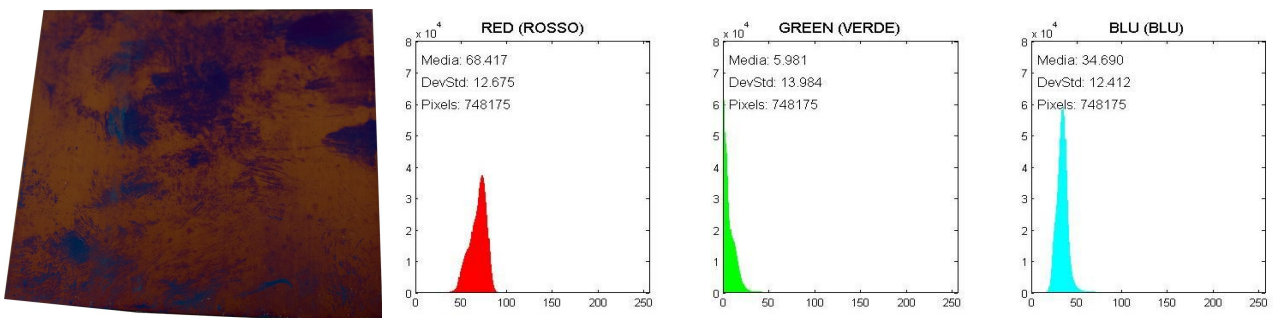


Fig. 4.241 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-A (campione 4).

# C-450-6-316-06-B:

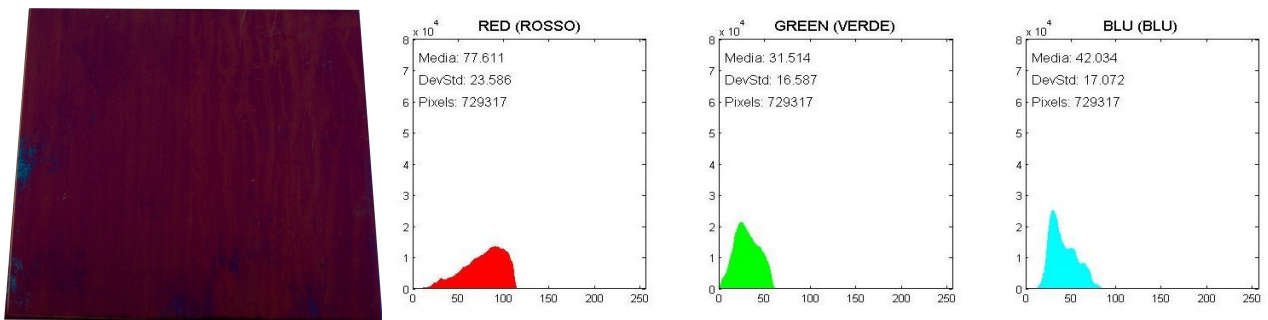


Fig. 4.242 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-B (campione 1).

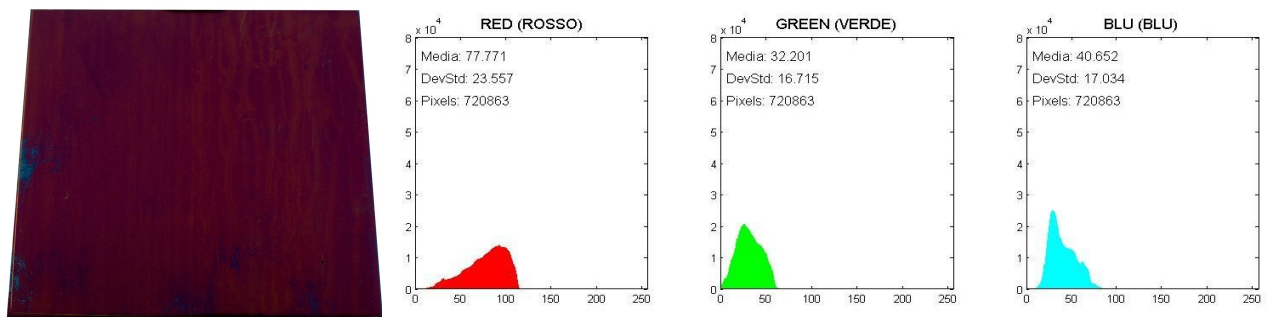


Fig. 4.243 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-B (campione 2).

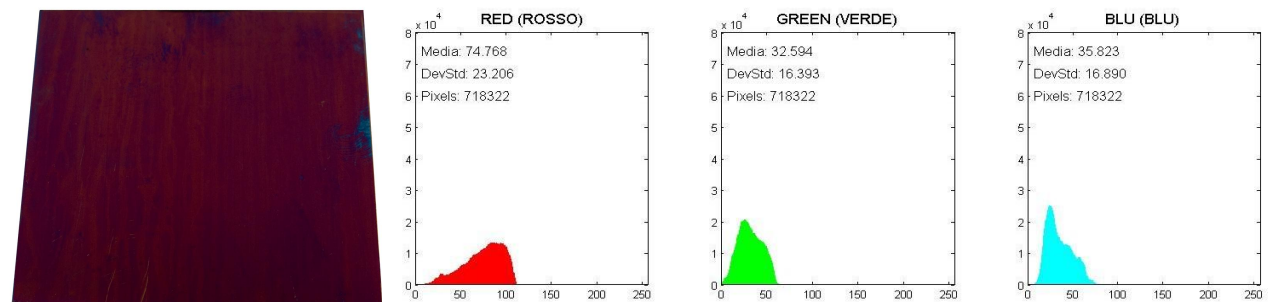


Fig. 4.244 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-B (campione 3).

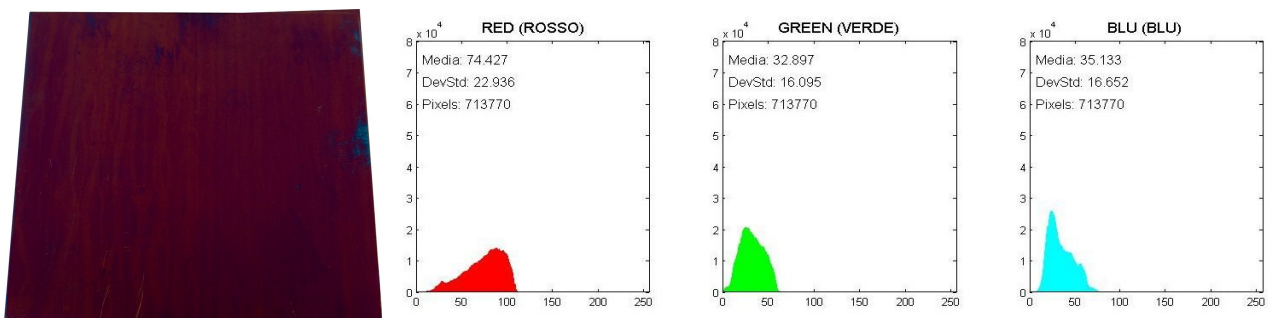


Fig. 4.245 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-450-6-316-06-B (campione 4).

# N-450-1-316-06-A:

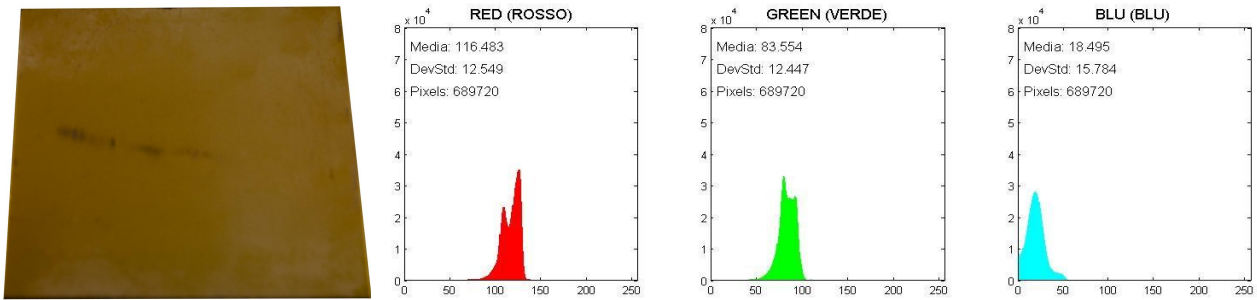


Fig. 4.246 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-A (campione 1).

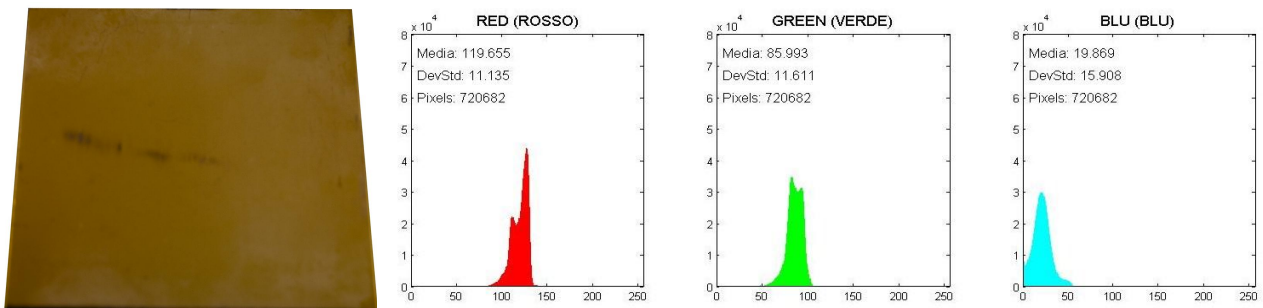


Fig. 4.247 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-A (campione 2).

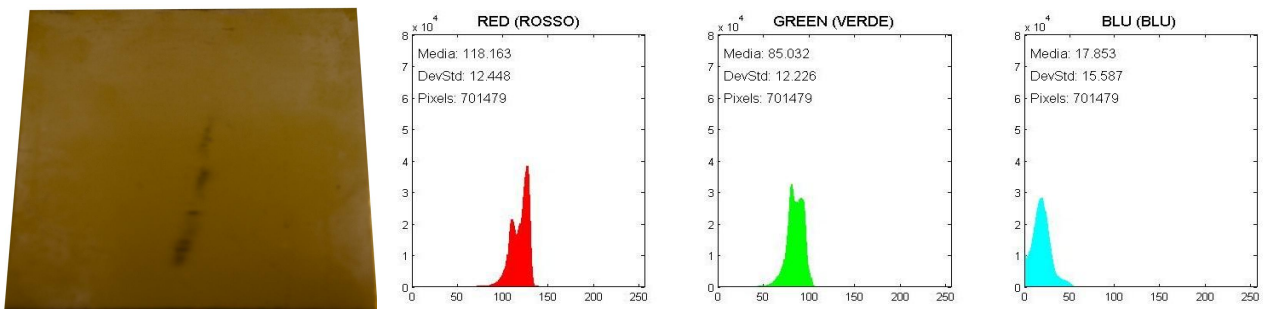


Fig. 4.248 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-A (campione 3).

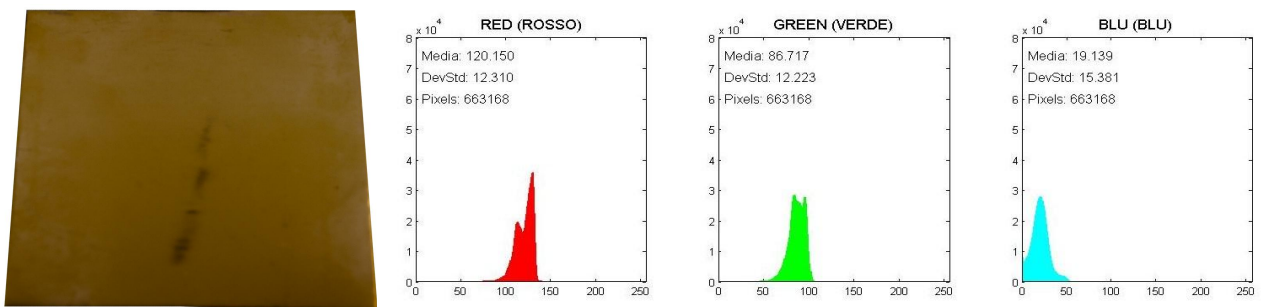


Fig. 4.249 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-A (campione 4).



# N-450-1-316-06-B:

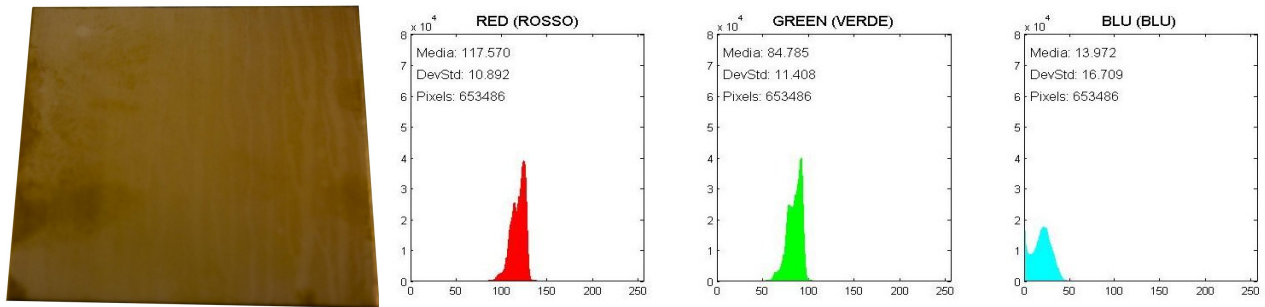


Fig. 4.250 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-B (campione 1).

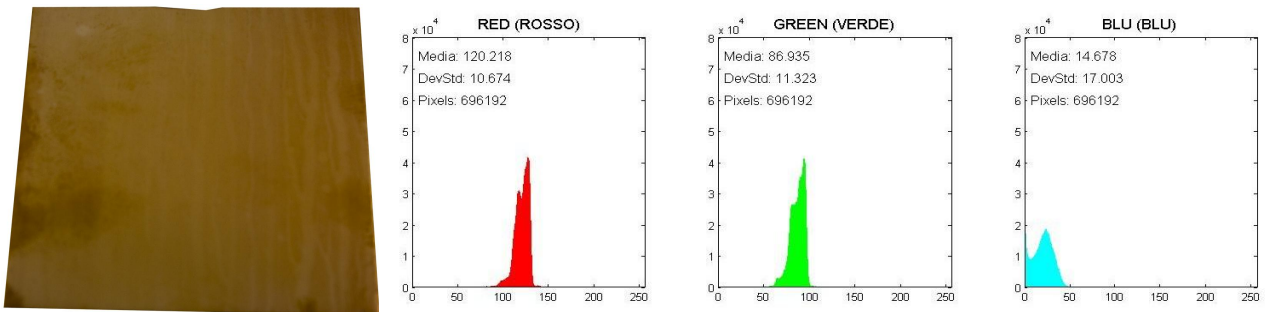


Fig. 4.251 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-B (campione 2).

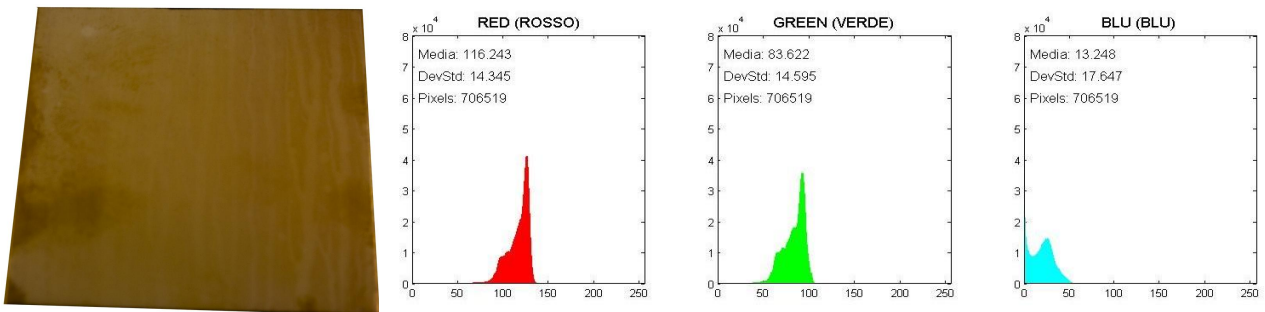


Fig. 4.252 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-B (campione 3).

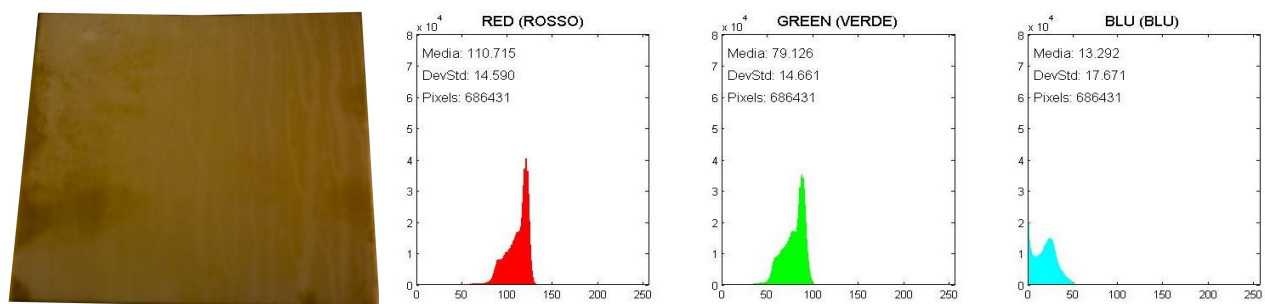


Fig. 4.253 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-1-316-06-B (campione 4).

# N-450-6-316-06-A:

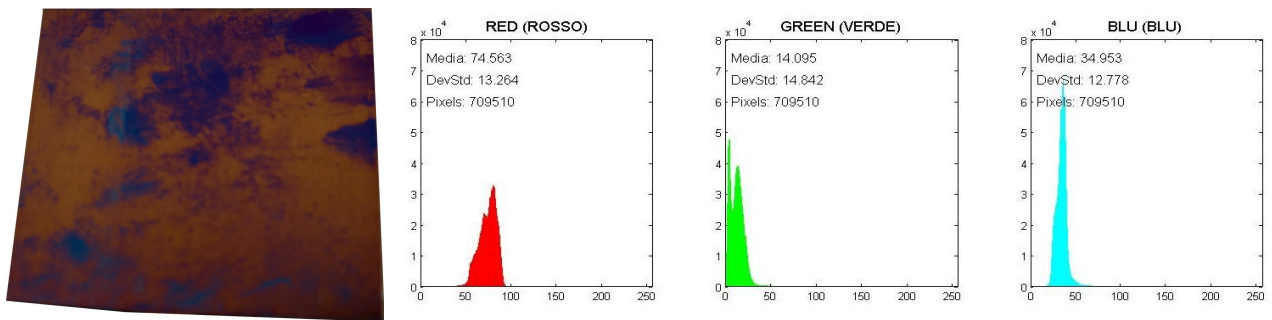


Fig. 4.254 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-A (campione 1).

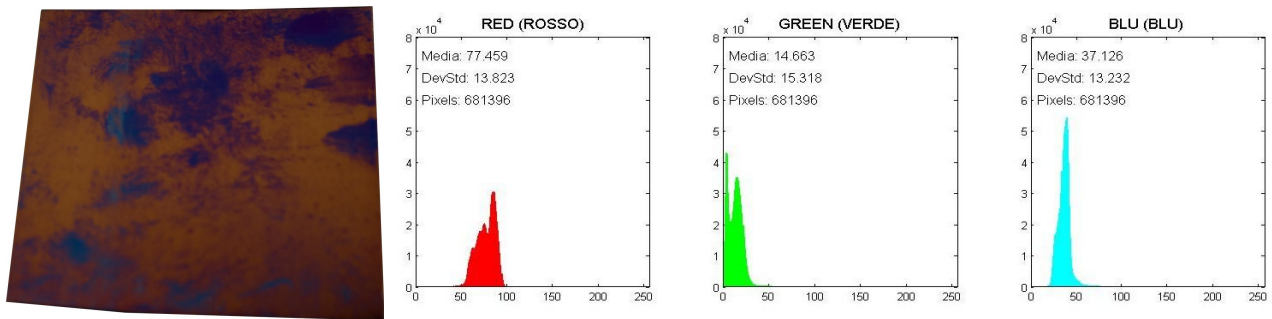


Fig. 4.255 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-A (campione 2).

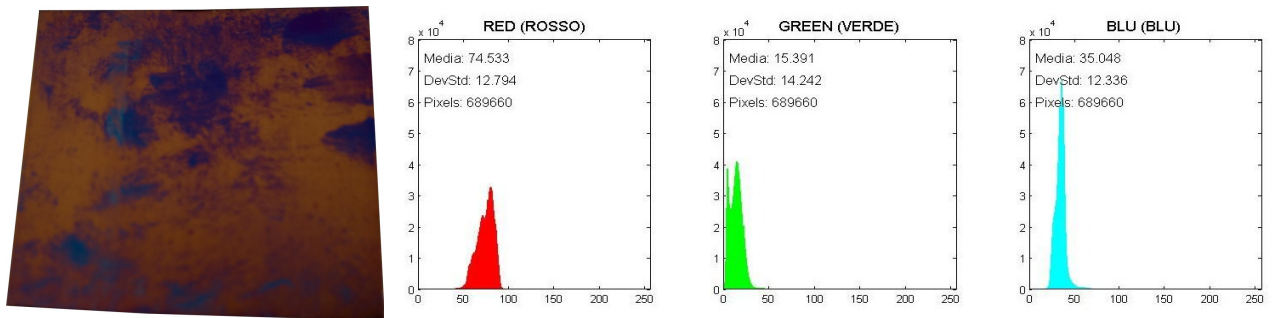


Fig. 4.256 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-A (campione 3).

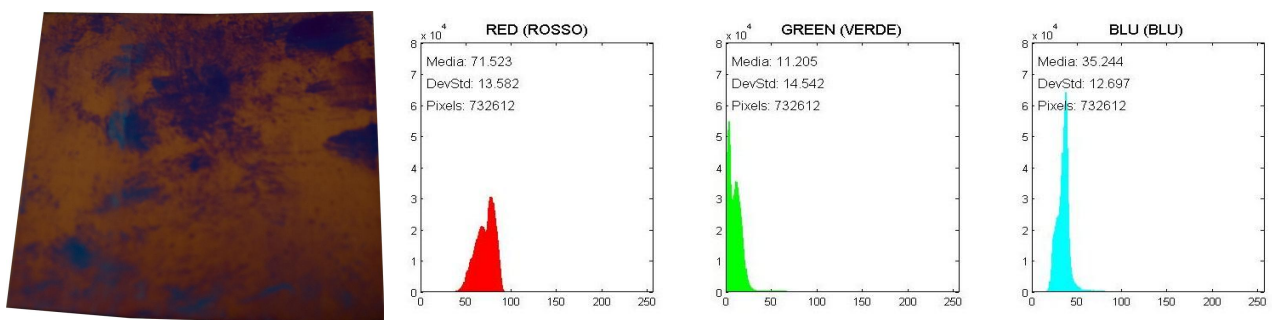


Fig. 4.257 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-A (campione 4).

# N-450-6-316-06-B:

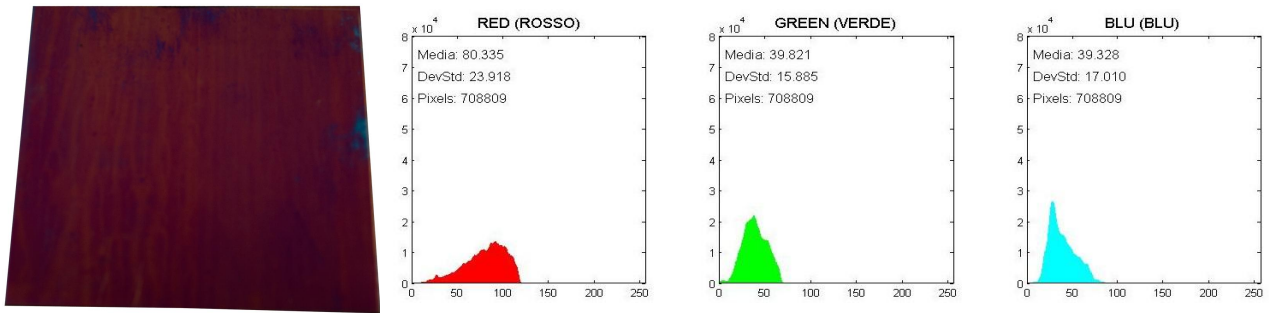


Fig. 4.258 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-B (campione 1).

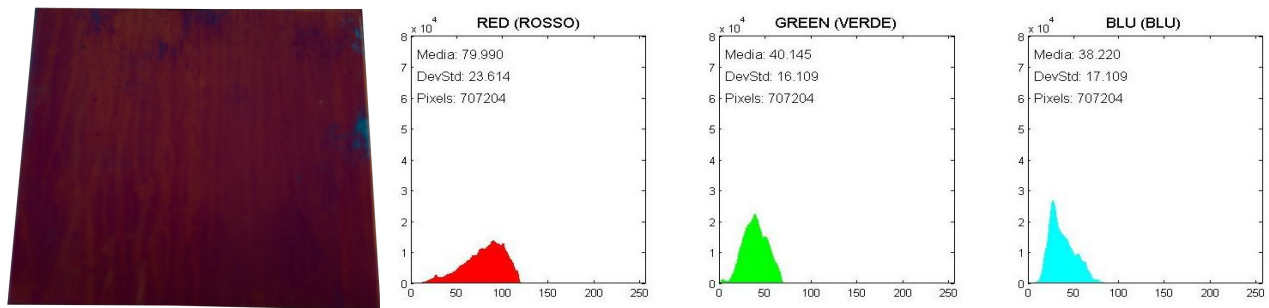


Fig. 4.259 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-B (campione 2).

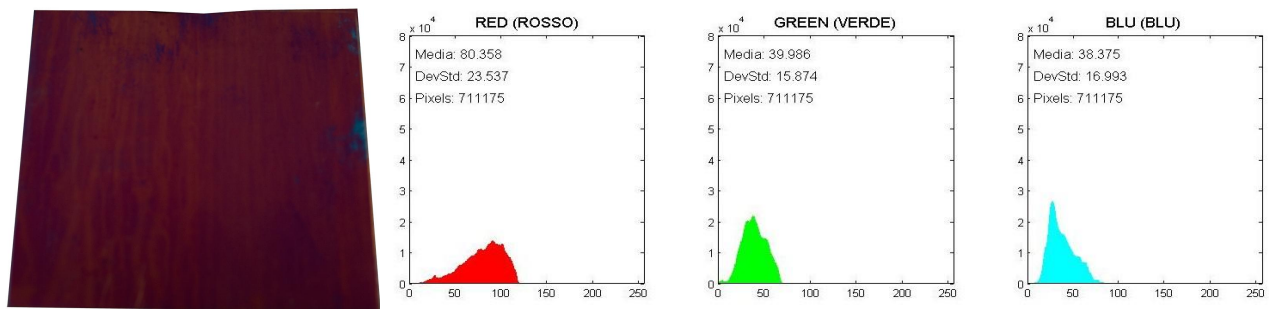


Fig. 4.260 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-B (campione 3).

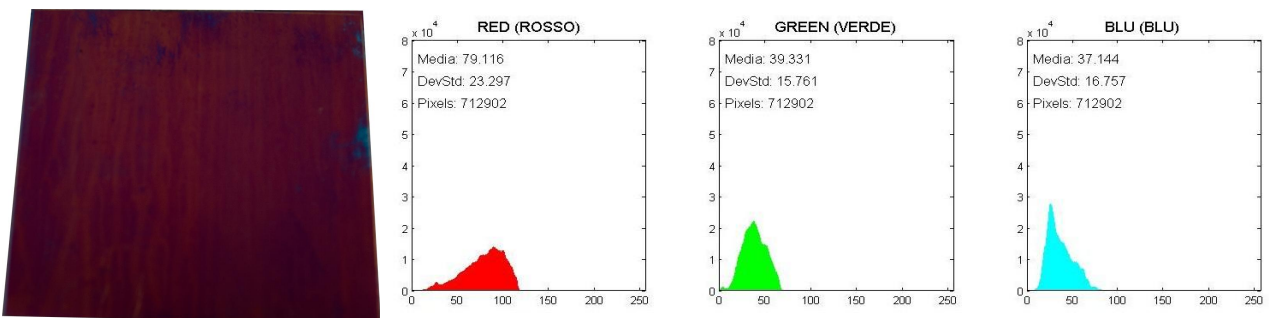


Fig. 4.261 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-450-6-316-06-B (campione 4).

# C-525-1-316-06-A:

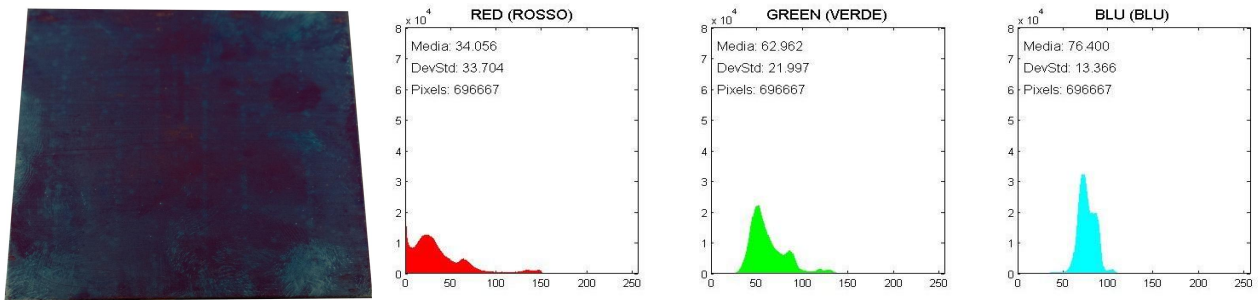


Fig. 4.262 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-A (campione 1).

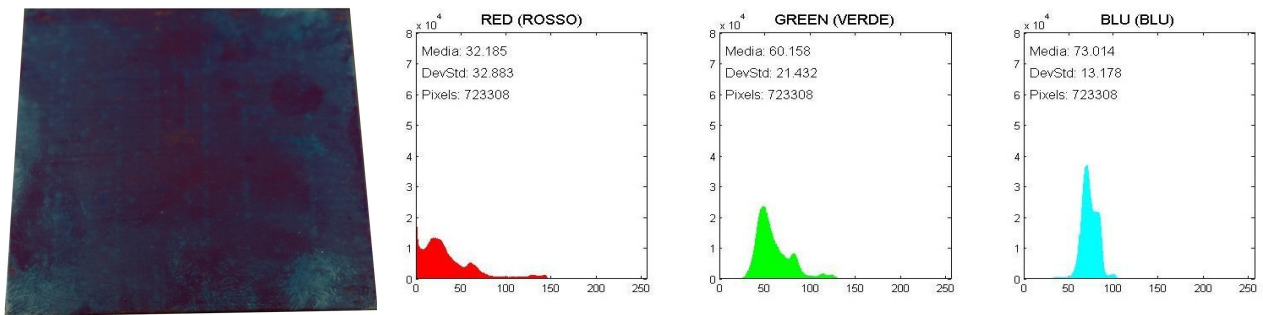


Fig. 4.263 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-A (campione 2).

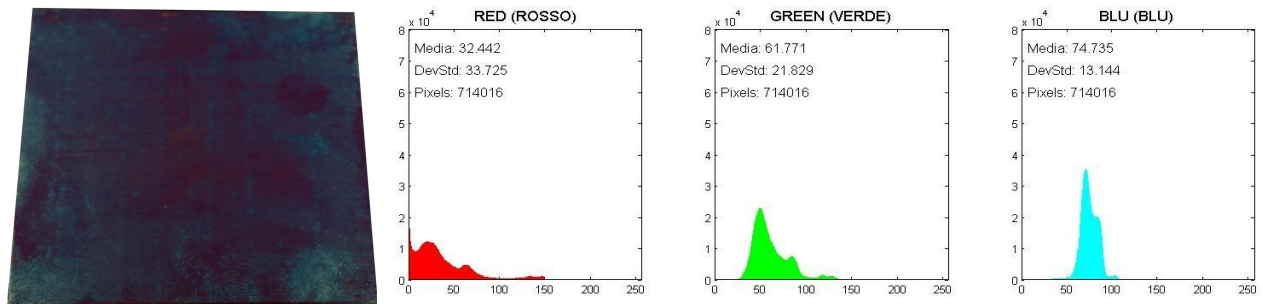


Fig. 4.264 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-A (campione 3).

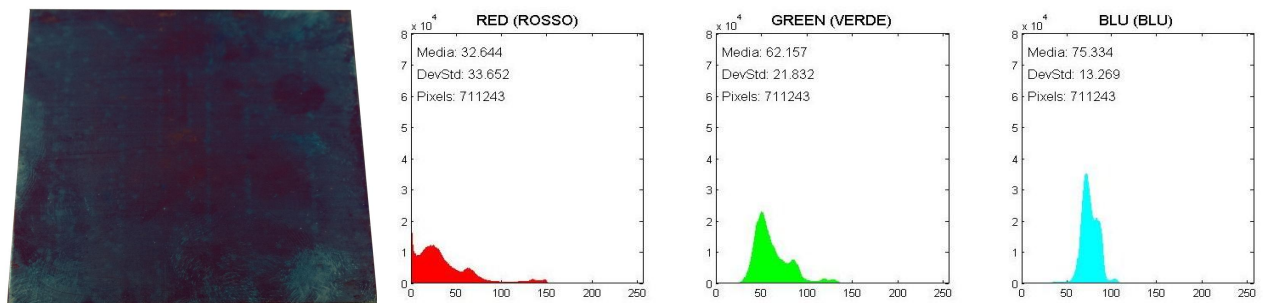


Fig. 4.265 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-A (campione 4).

# C-525-1-316-06-B:

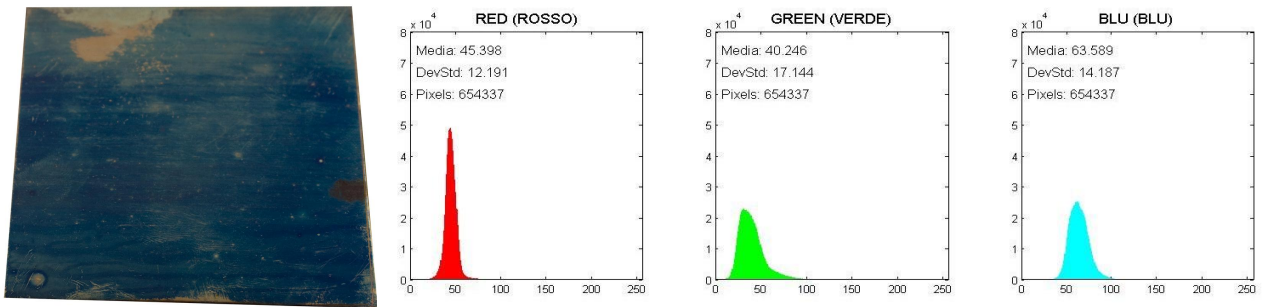


Fig. 4.266 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-B (campione 1).

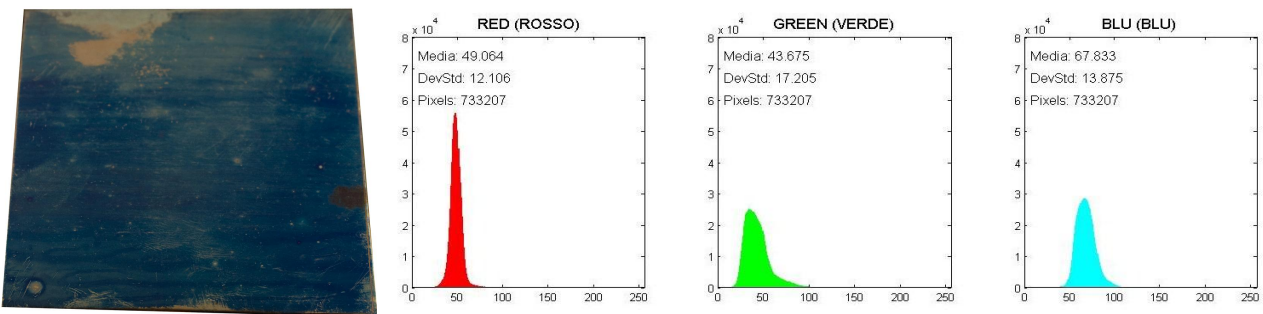


Fig. 4.267 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-B (campione 2).

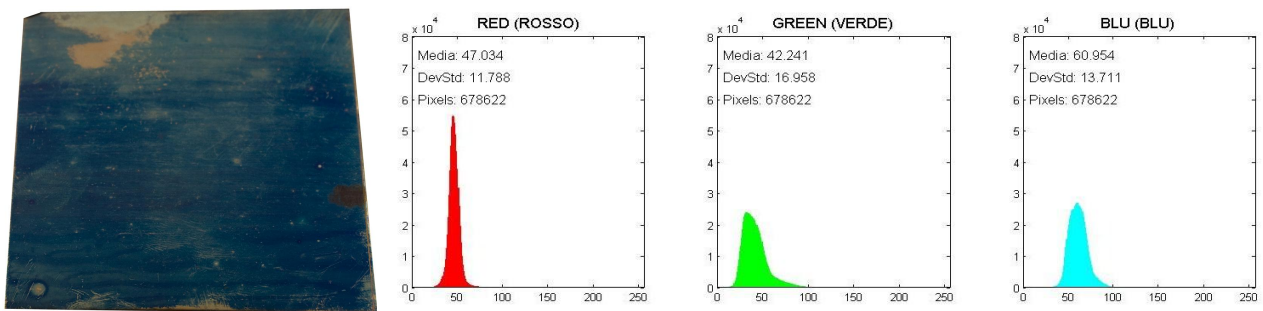


Fig. 4.268 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-B (campione 3).

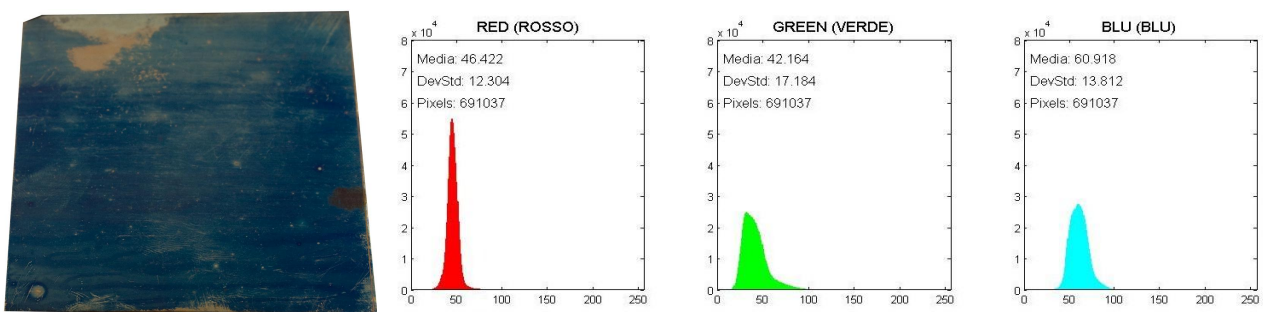


Fig. 4.269 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-1-316-06-B (campione 4).

# C-525-6-316-06-A:

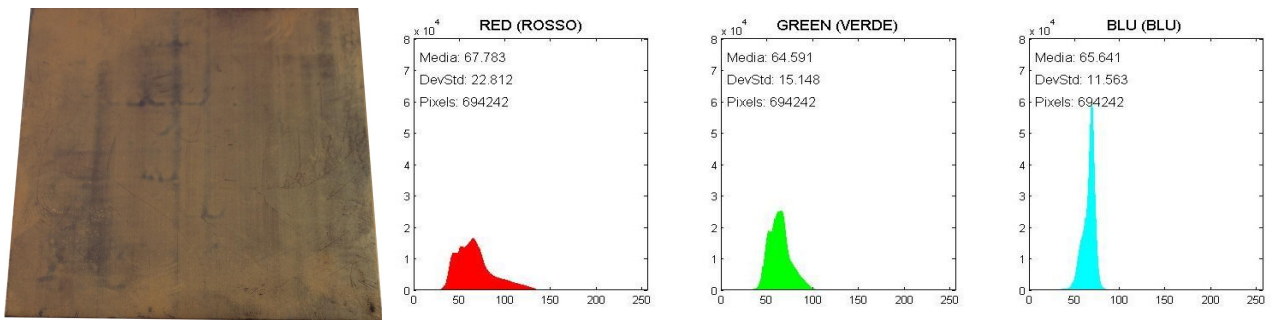


Fig. 4.270 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-A (campione 1).

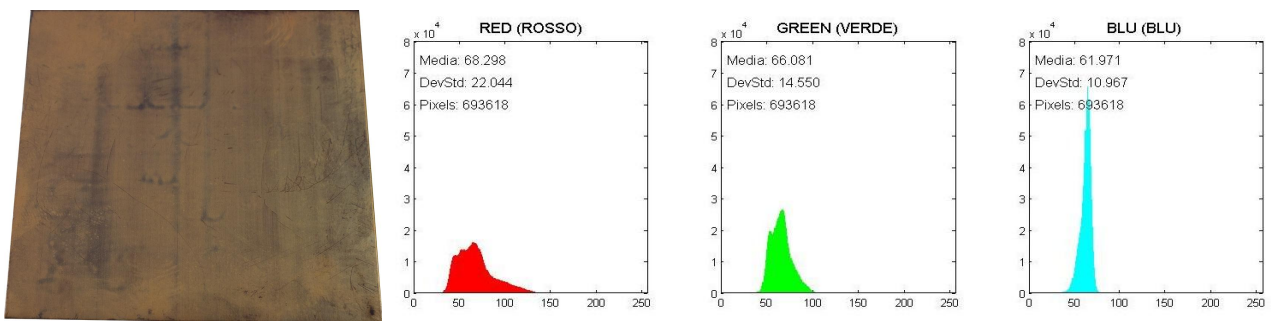


Fig. 4.271 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-A (campione 2).

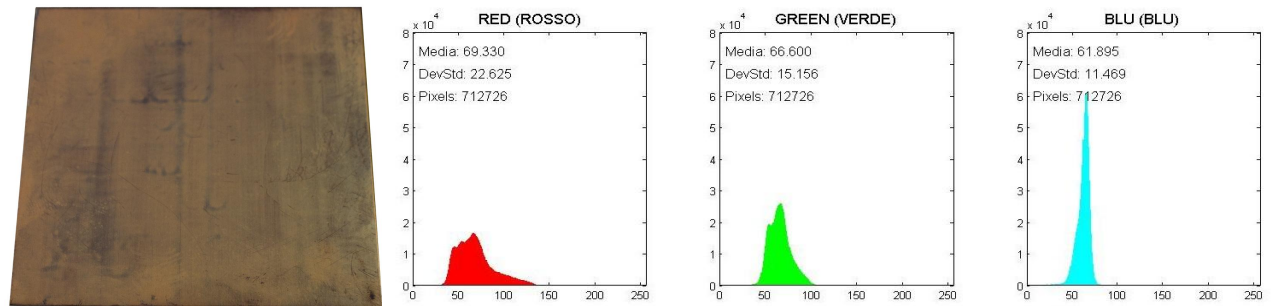


Fig. 4.272 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-A (campione 3).

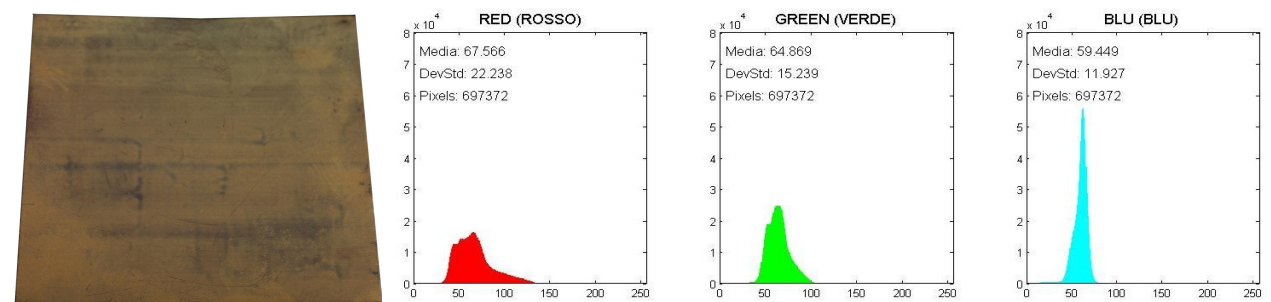


Fig. 4.273 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-A (campione 4).

## C-525-6-316-06-B:

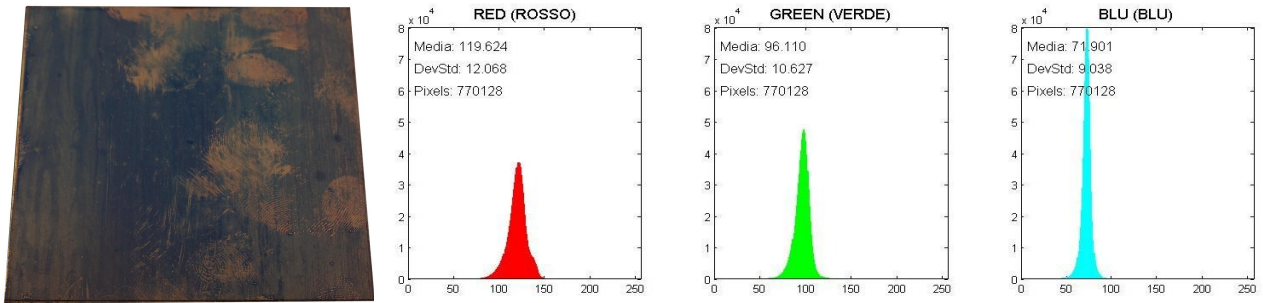


Fig. 4.274 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-B (campione 1).

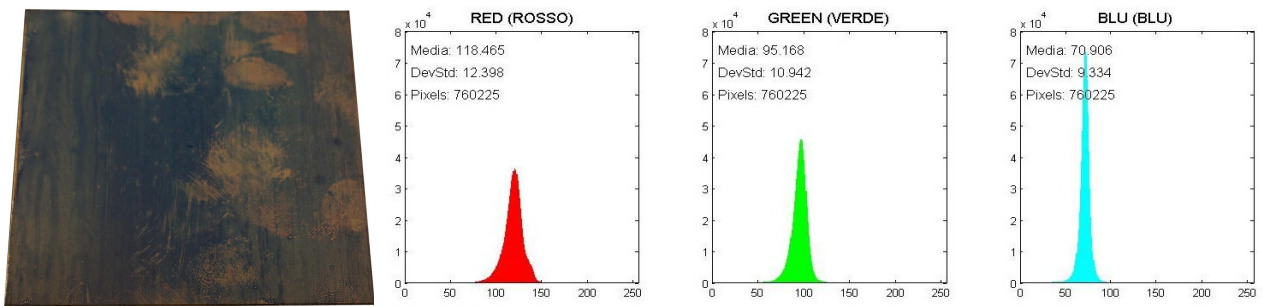


Fig. 4.275 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-B (campione 2).

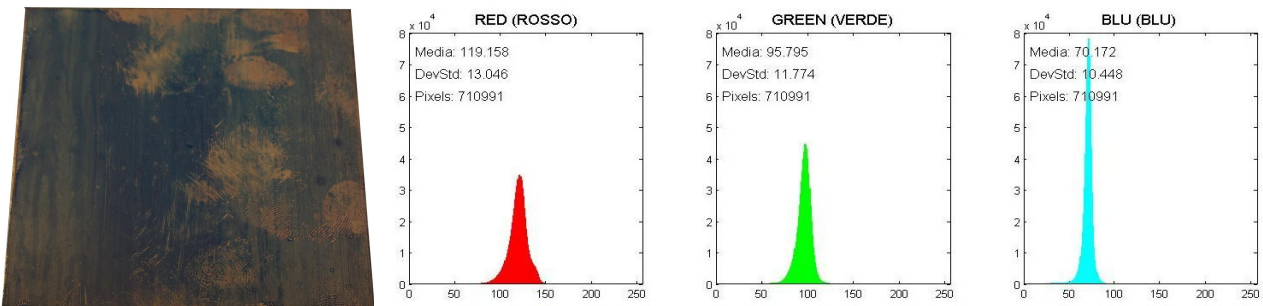


Fig. 4.276 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-B (campione 3).

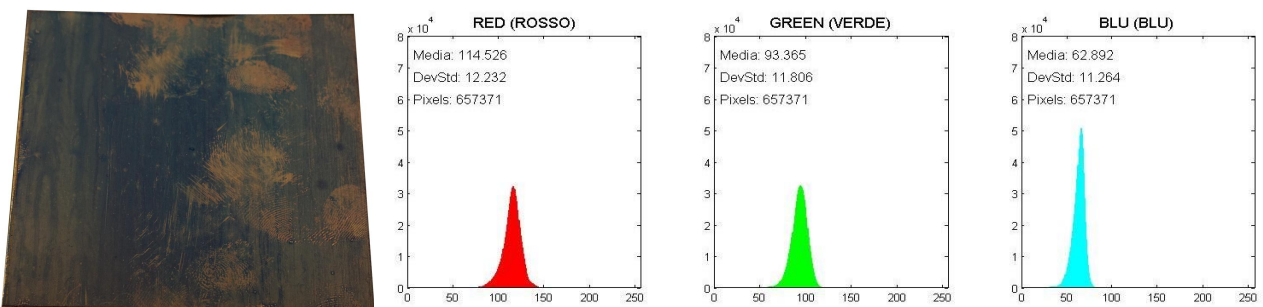


Fig. 4.277 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-525-6-316-06-B (campione 4).

# N-525-1-316-06-A:

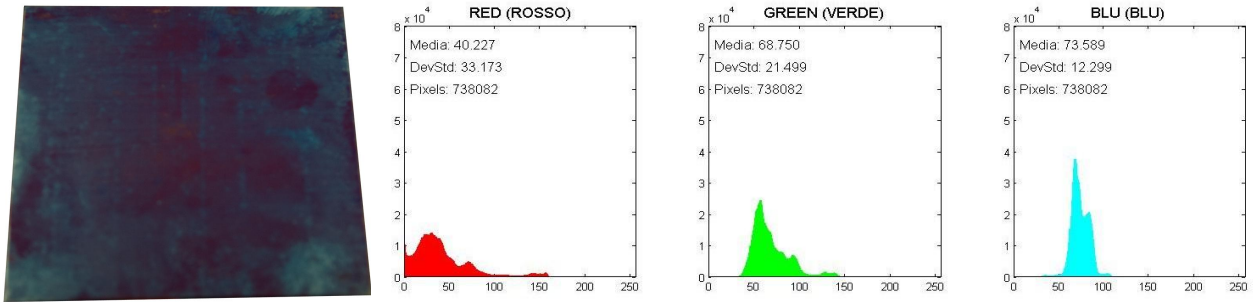


Fig. 4.278 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-A (campione 1).

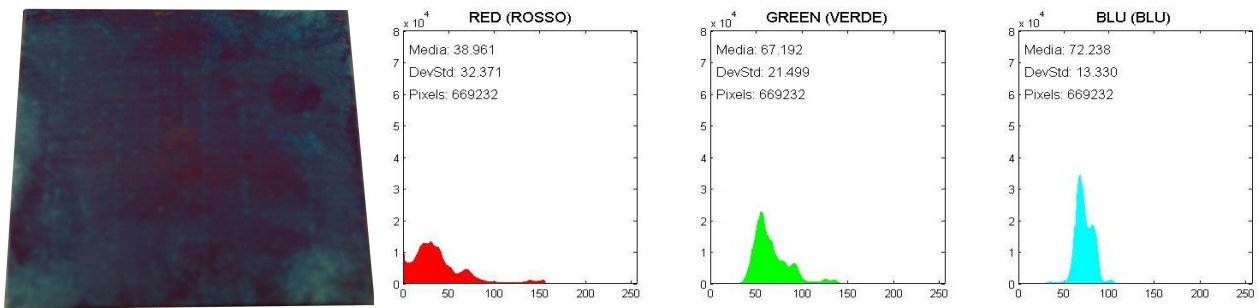


Fig. 4.279 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-A (campione 2).

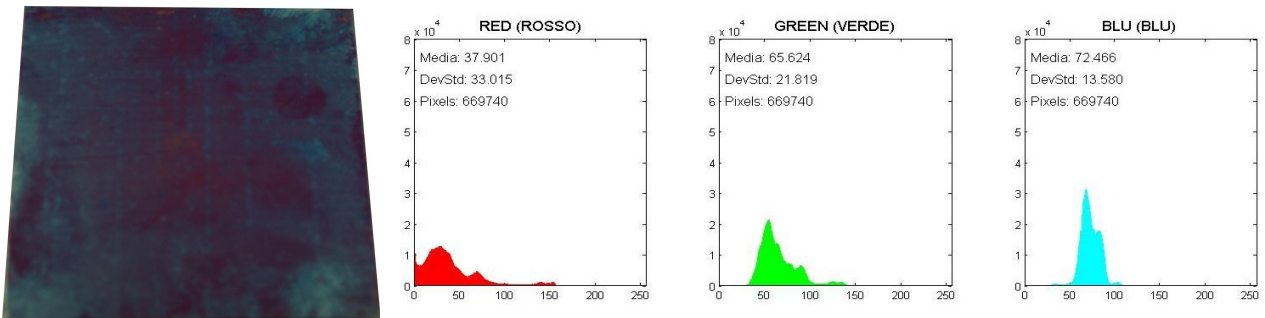


Fig. 4.280 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-A (campione 3).

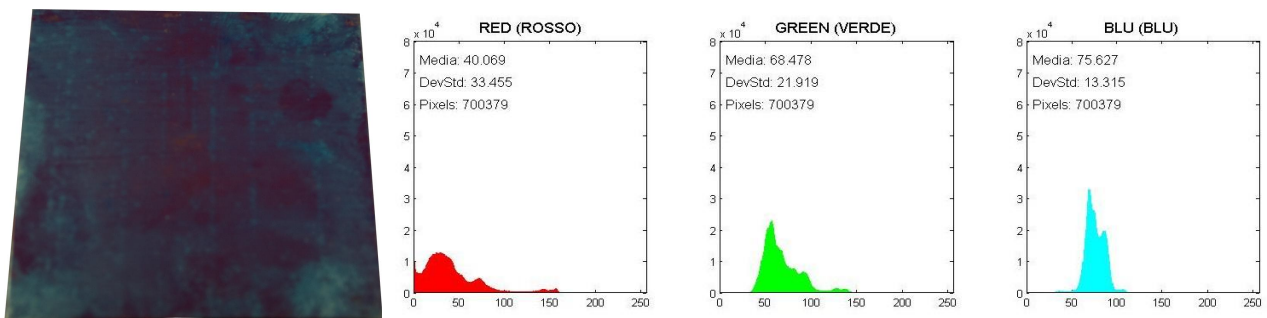


Fig. 4.281 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-A (campione 4).



# N-525-1-316-06-B:

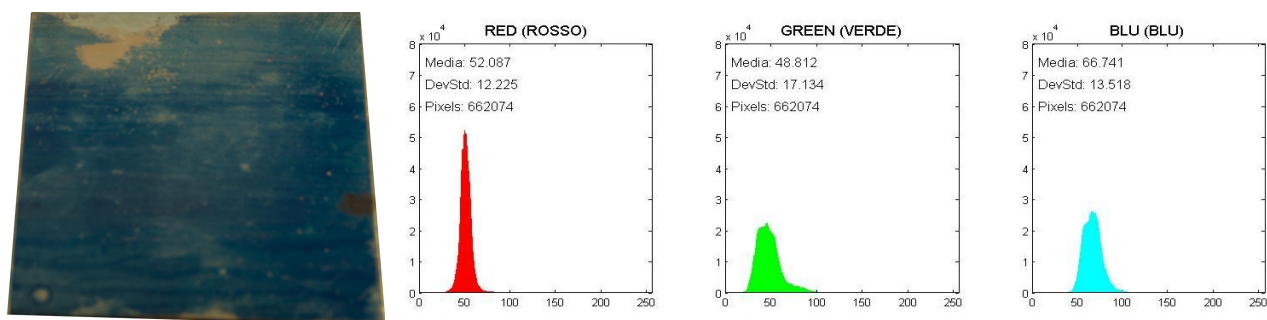


Fig. 4.282 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-B (campione 1).

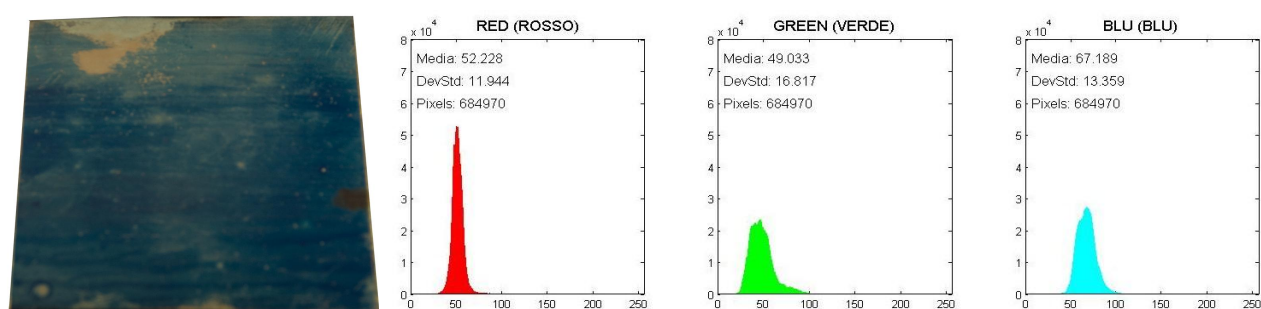


Fig. 4.283 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-B (campione 2).

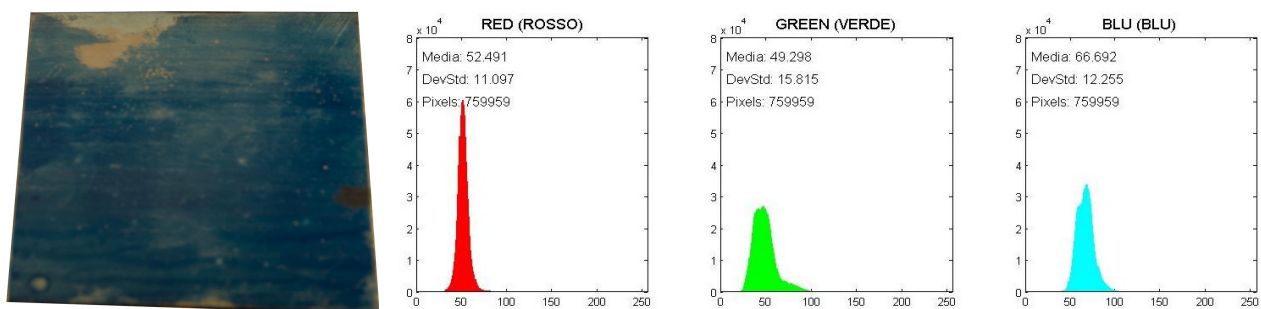


Fig. 4.284 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-B (campione 3).

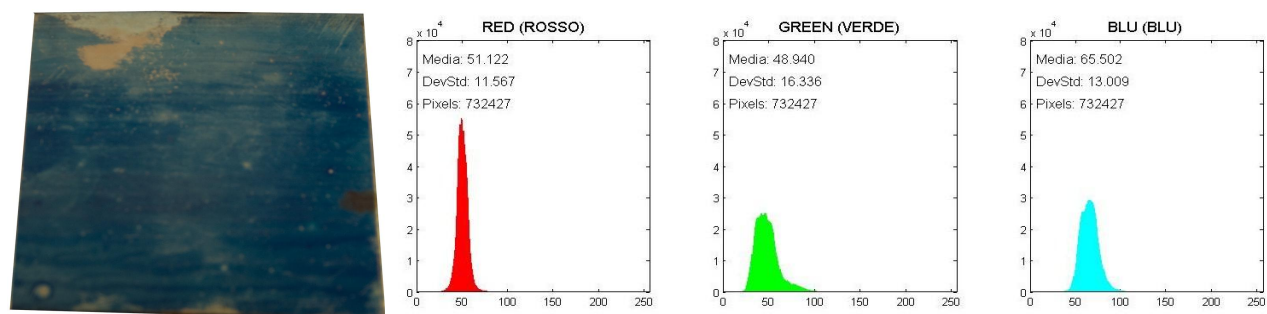


Fig. 4.285 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-1-316-06-B (campione 4).

# N-525-6-316-06-A:

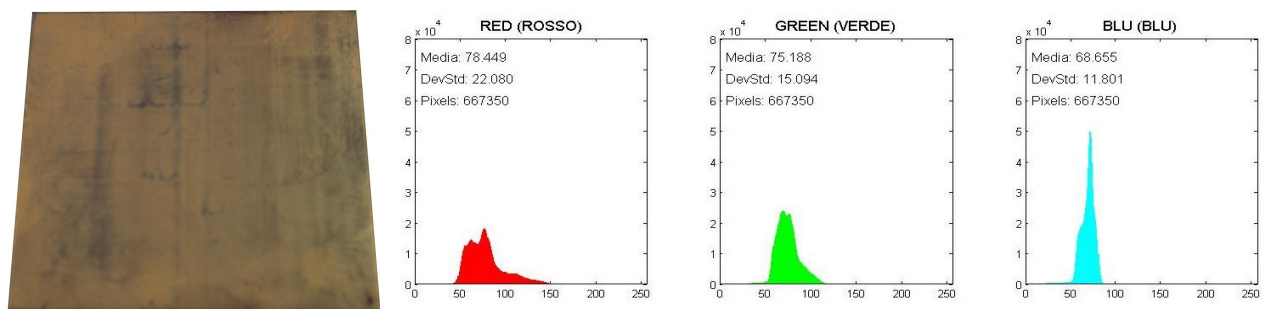


Fig. 4.286 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-A (campione 1).

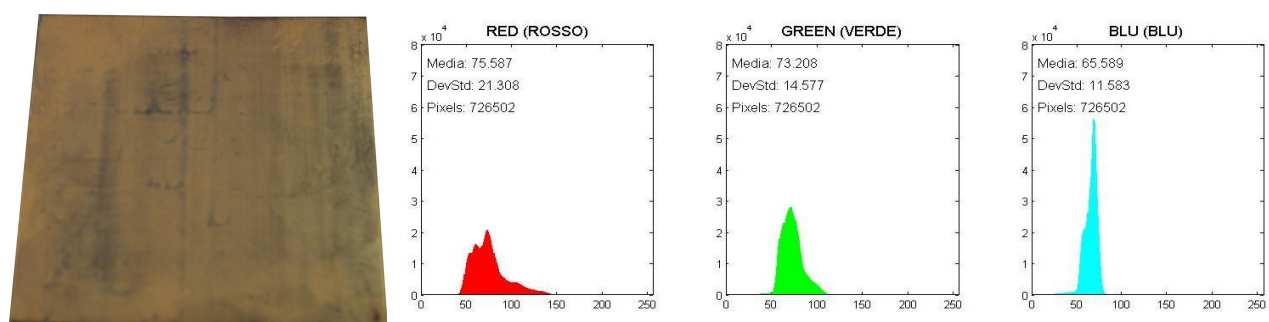


Fig. 4.287 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-A (campione 2).

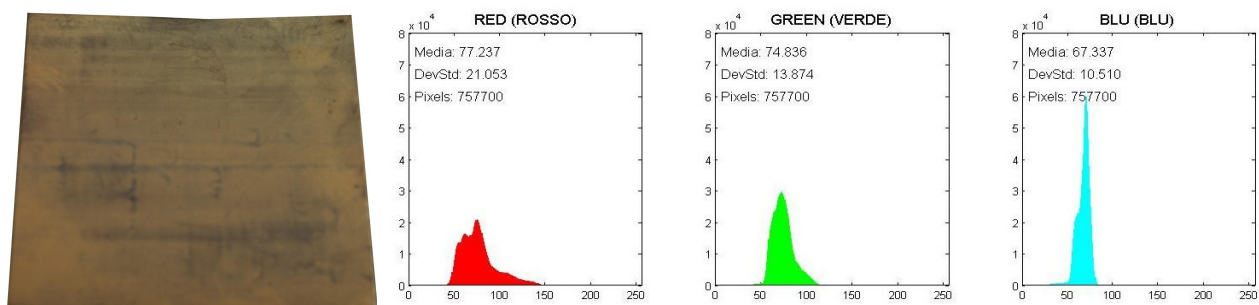


Fig. 4.288 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-A (campione 3).

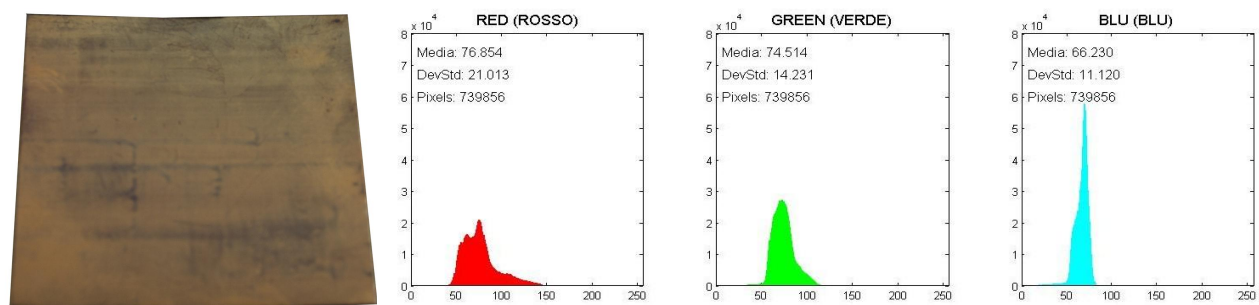


Fig. 4.289 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-A (campione 4).

# N-525-6-316-06-B:

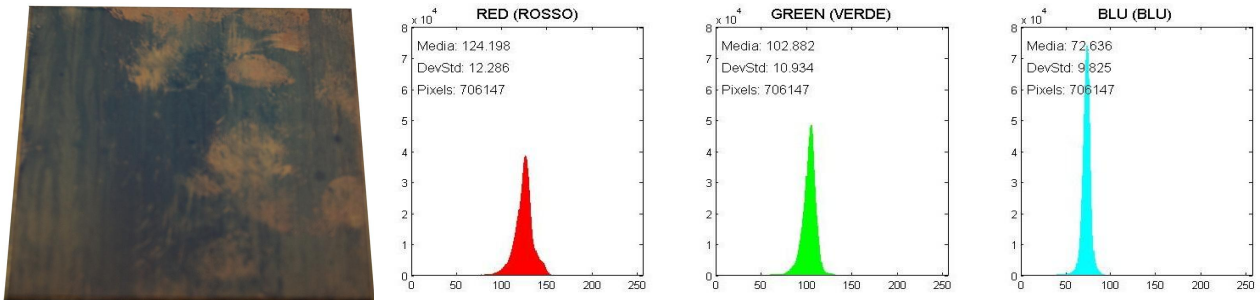


Fig. 4.290 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-B (campione 1).

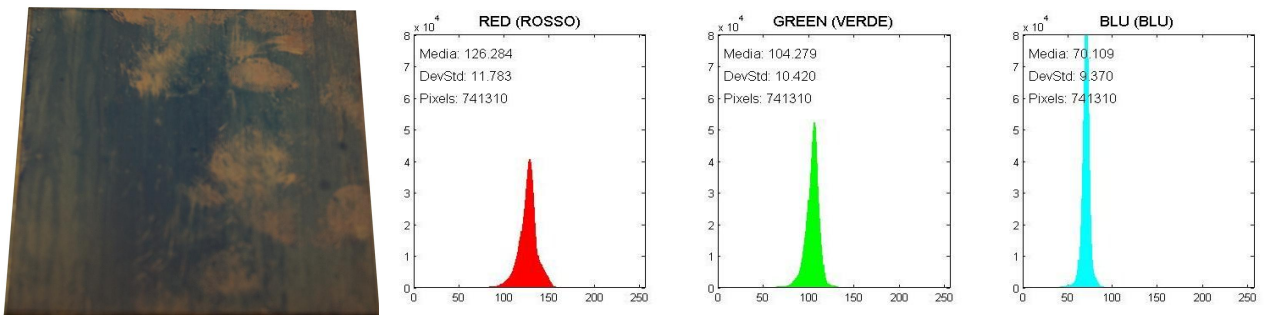


Fig. 4.291 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-B (campione 2).

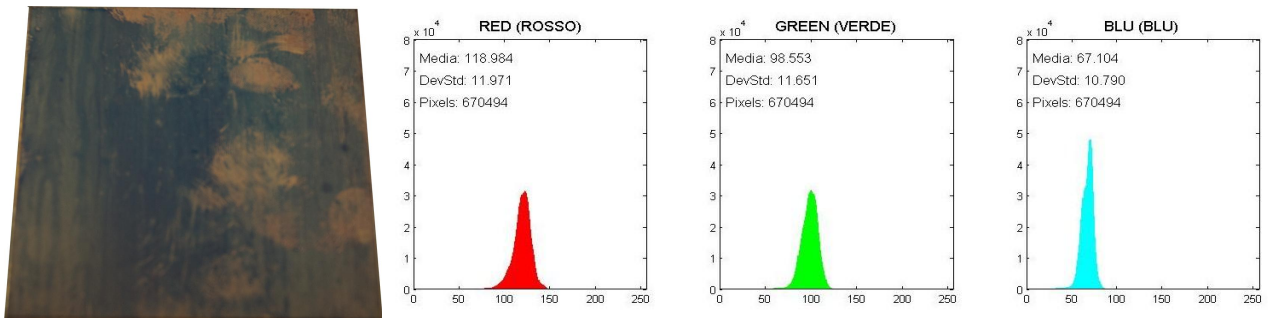


Fig. 4.292 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-B (campione 3).

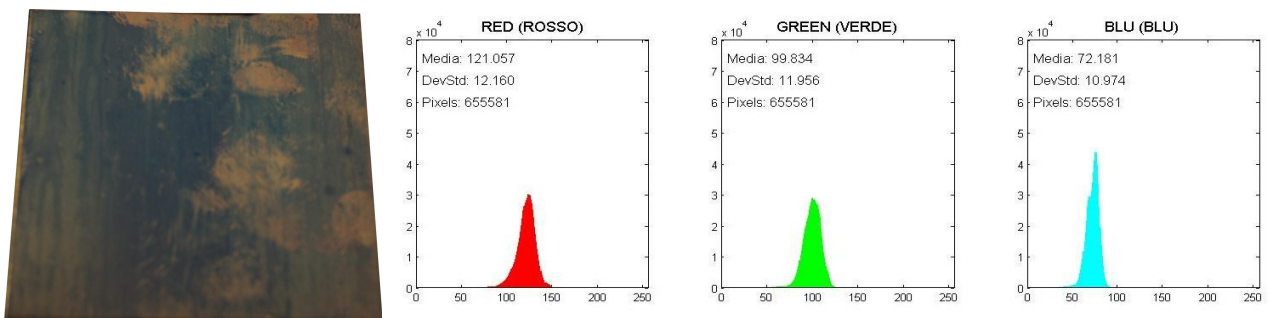


Fig. 4.293 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-525-6-316-06-B (campione 4).

# C-600-1-316-06-A:

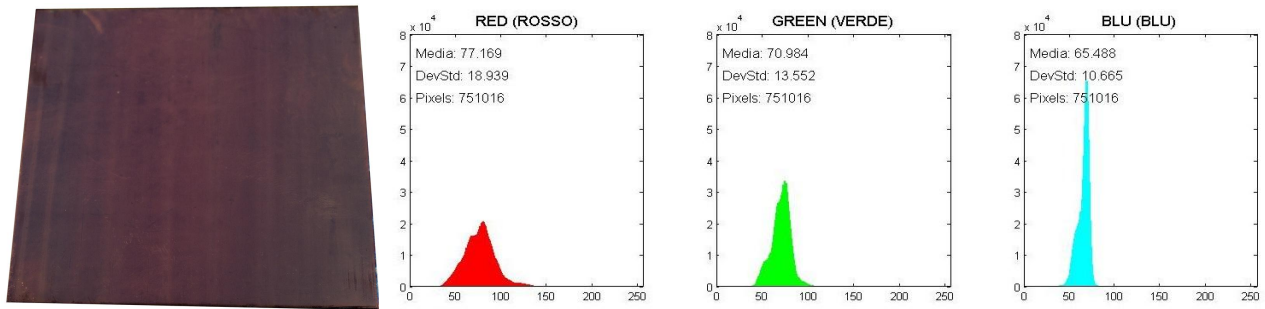


Fig. 4.294 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-A (campione 1).

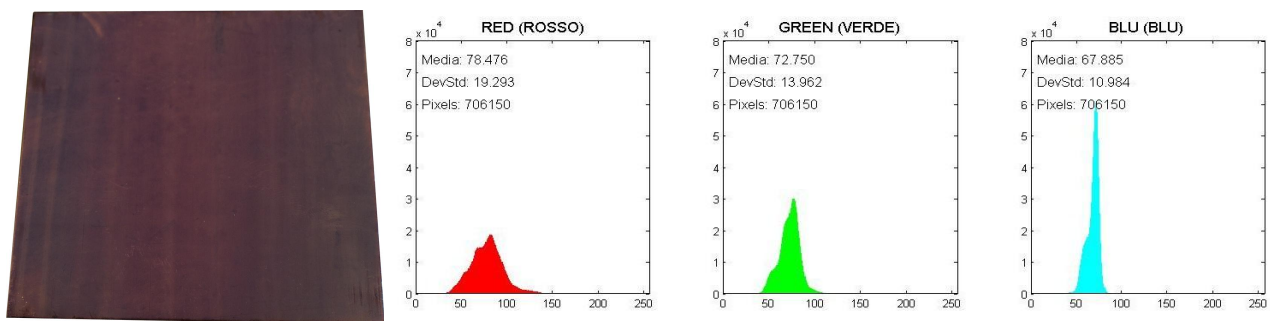


Fig. 4.295 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-A (campione 2).

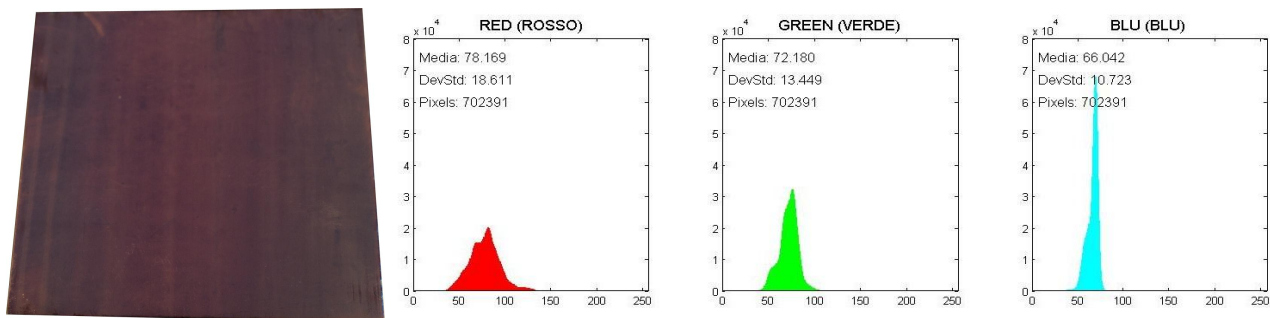


Fig. 4.296 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-A (campione 3).

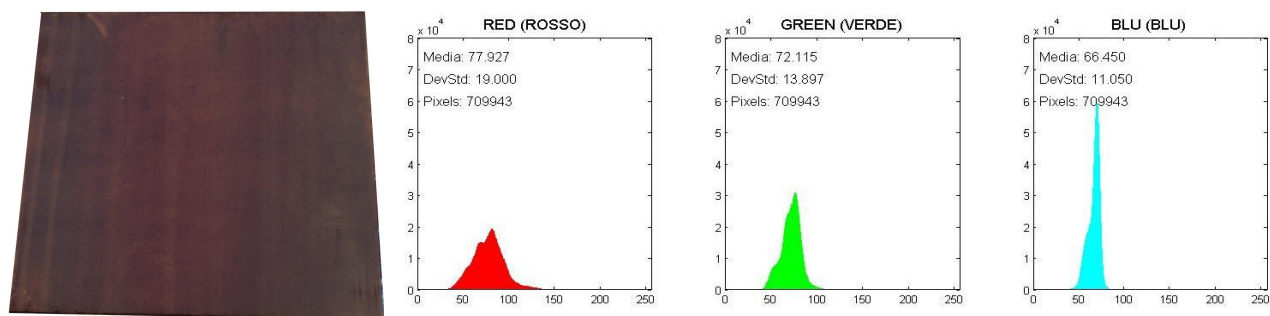


Fig. 4.297 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-A (campione 4).

# C-600-1-316-06-B:

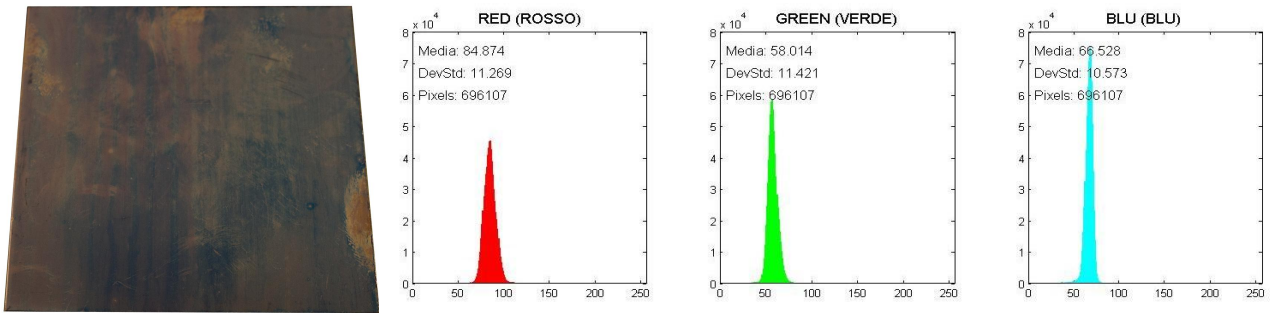


Fig. 4.298 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-B (campione 1).

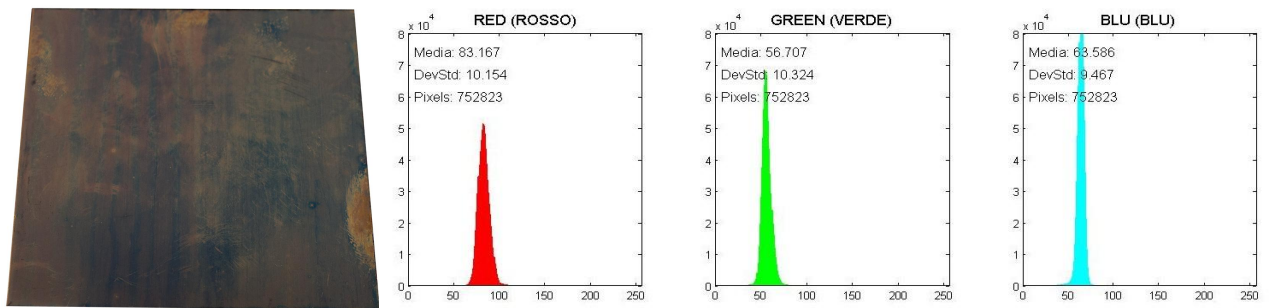


Fig. 4.299 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-B (campione 2).

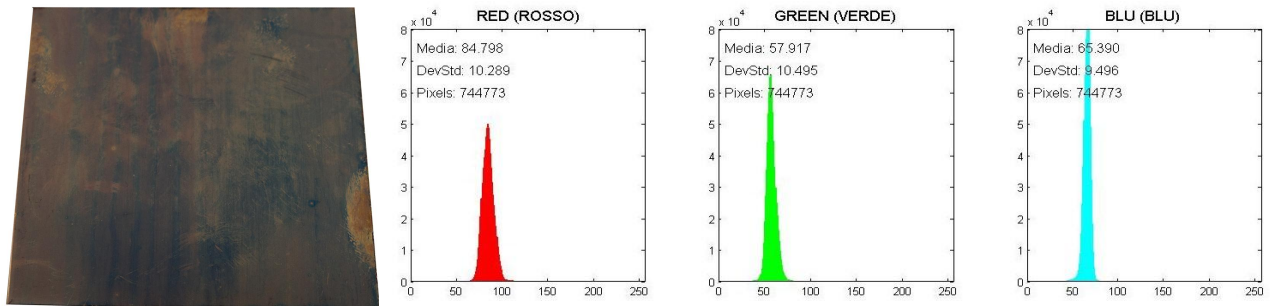


Fig. 4.300 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-B (campione 3).

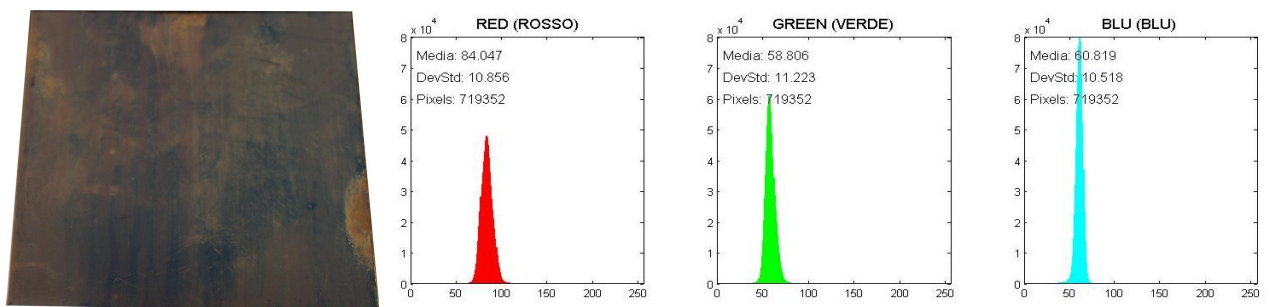


Fig. 4.301 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-1-316-06-B (campione 3).

# C-600-6-316-06-A:

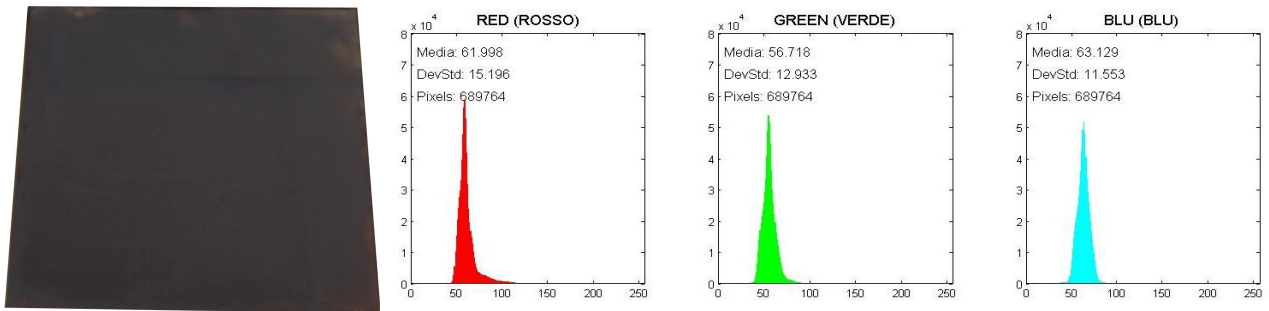


Fig. 4.302 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-A (campione 1).

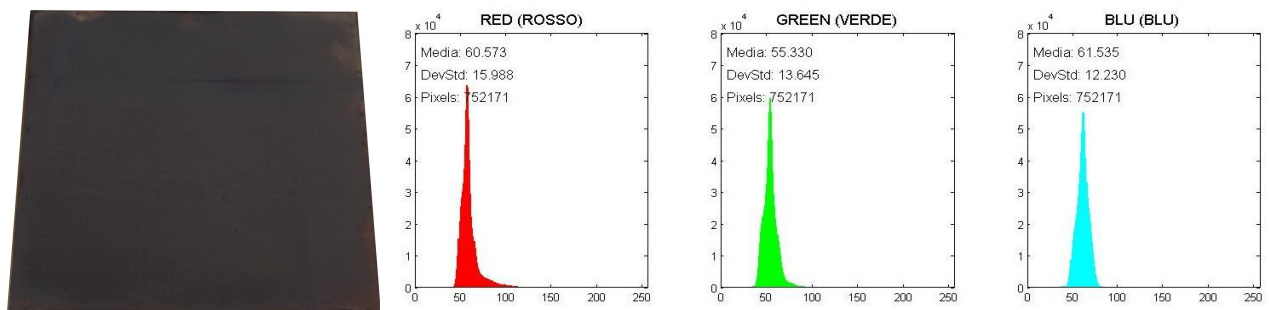


Fig. 4.303 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-A (campione 3).

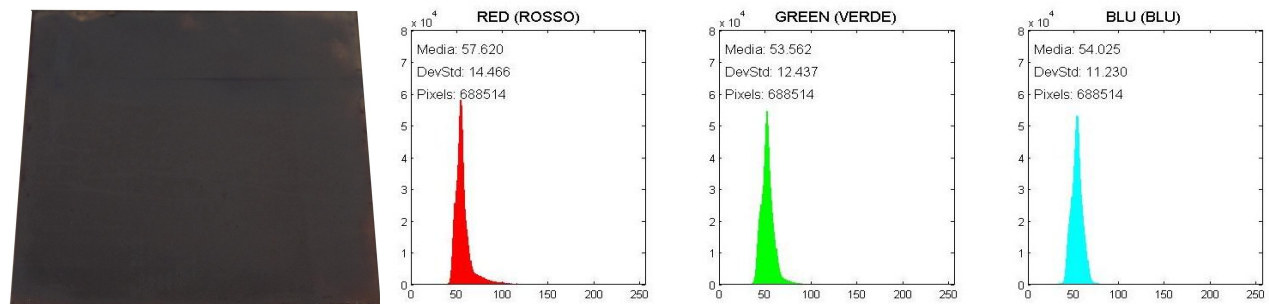


Fig. 4.304 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-A (campione 3).

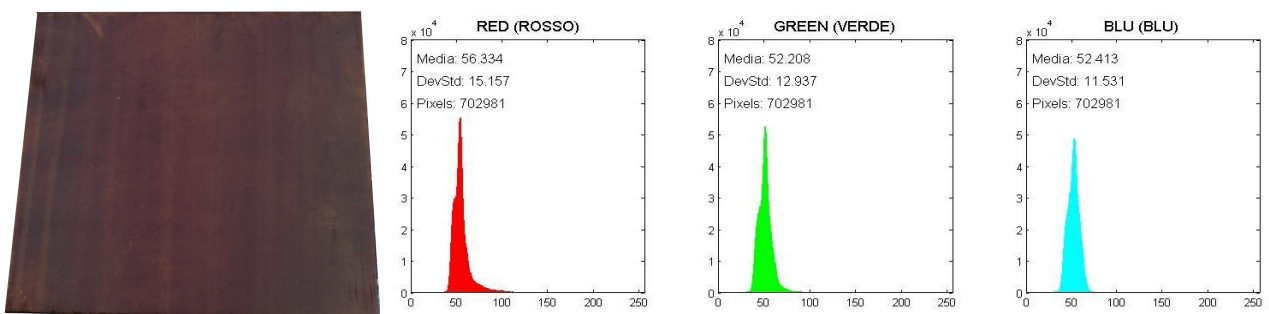


Fig. 4.305 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-A (campione 4).

# C-600-6-316-06-B:

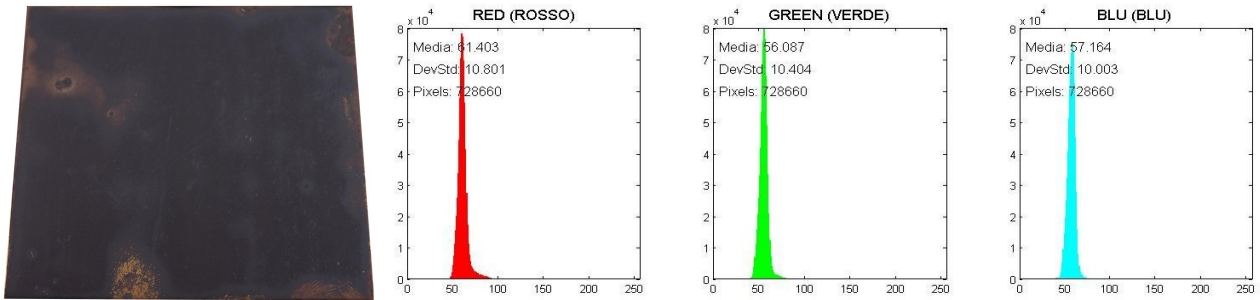


Fig. 4.306 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-B (campione 1).

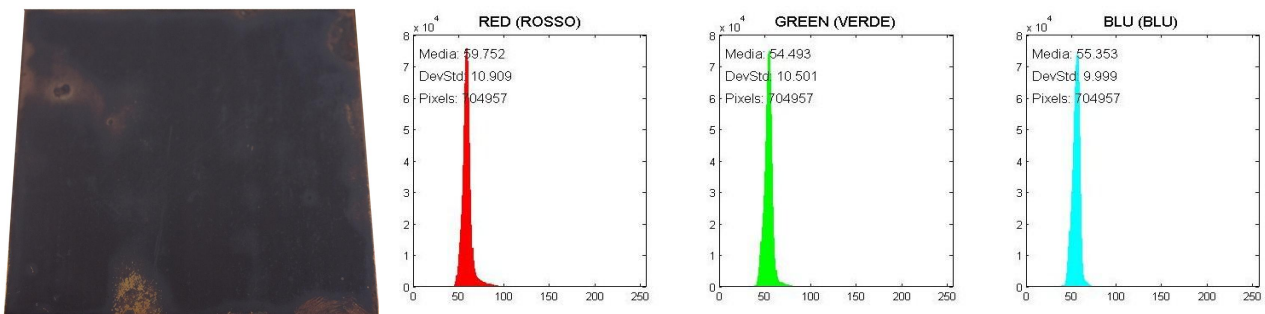


Fig. 4.307 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-B (campione 2).

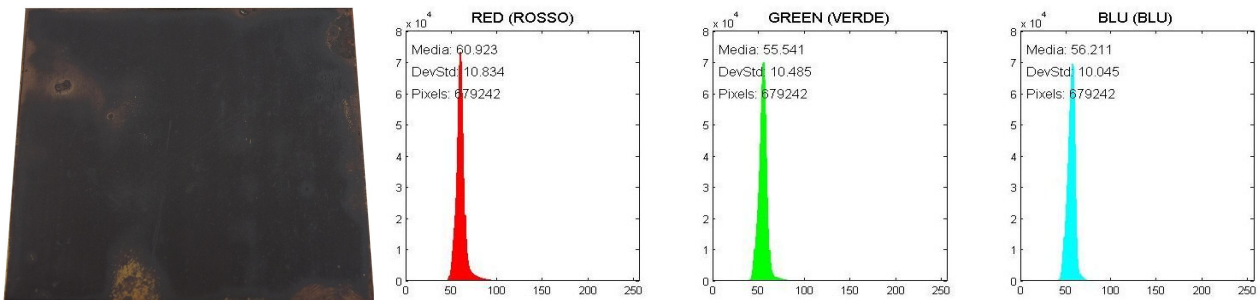


Fig. 4.308 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-B (campione 3).

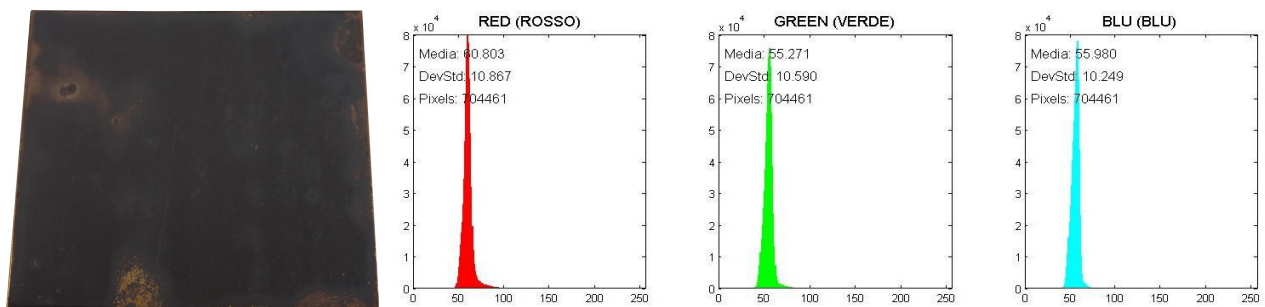


Fig. 4.309 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-600-6-316-06-B (campione 4).

# N-600-1-316-06-A:

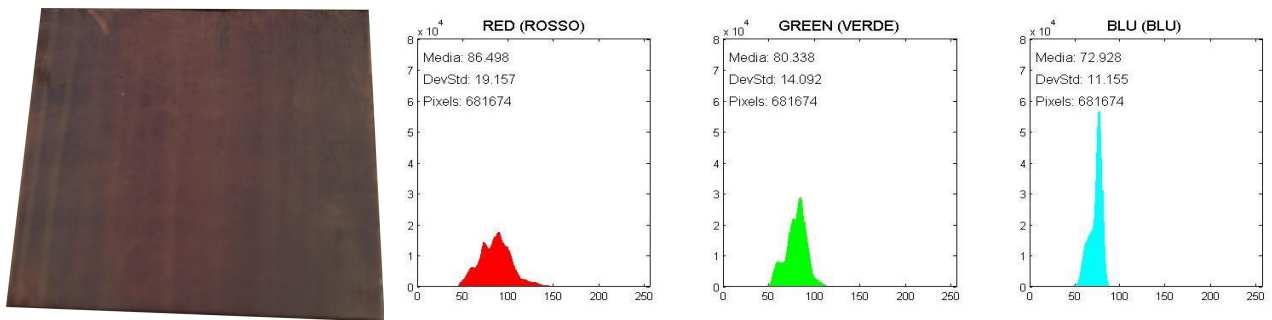


Fig. 4.310 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-A (campione 1).

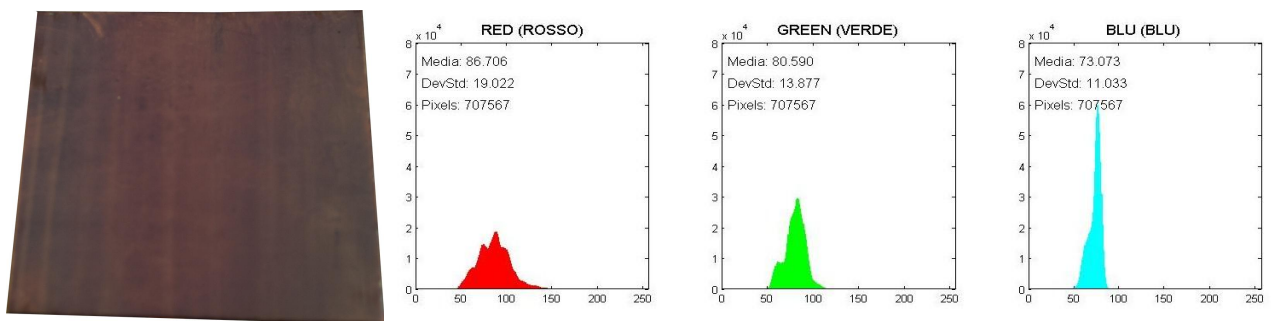


Fig. 4.311 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-A (campione 2).

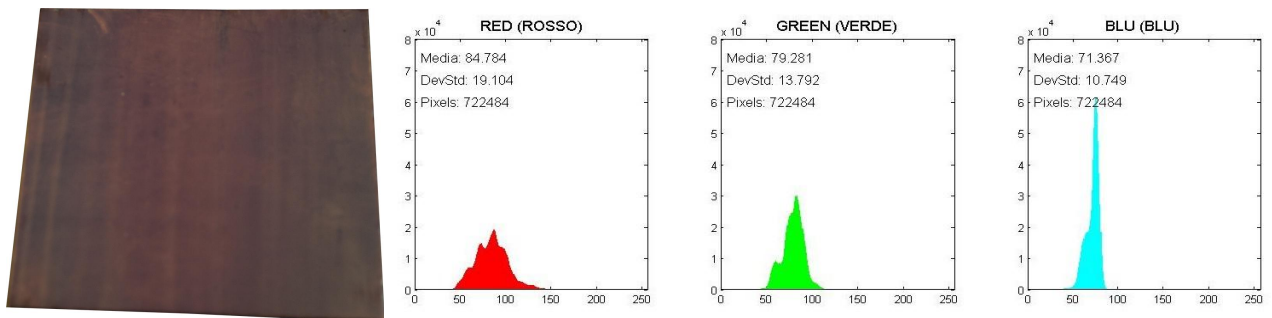


Fig. 4.312 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-A (campione 3).

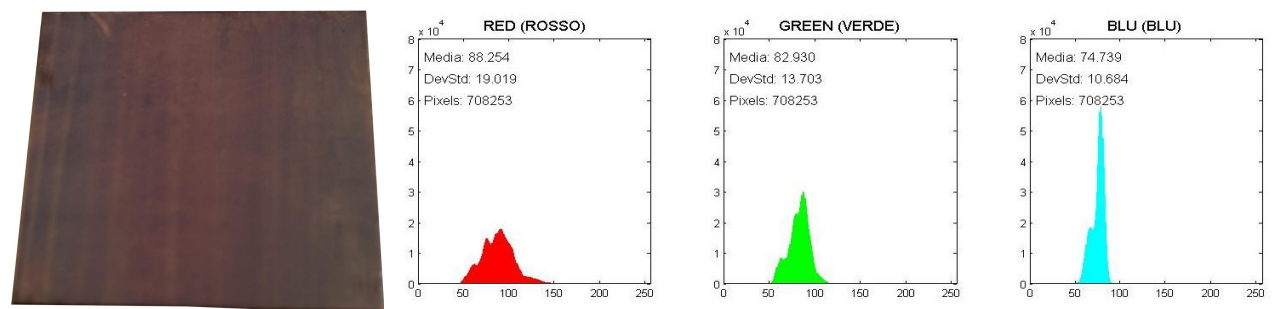


Fig. 4.313 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-A (campione 4).



# N-600-1-316-06-B:

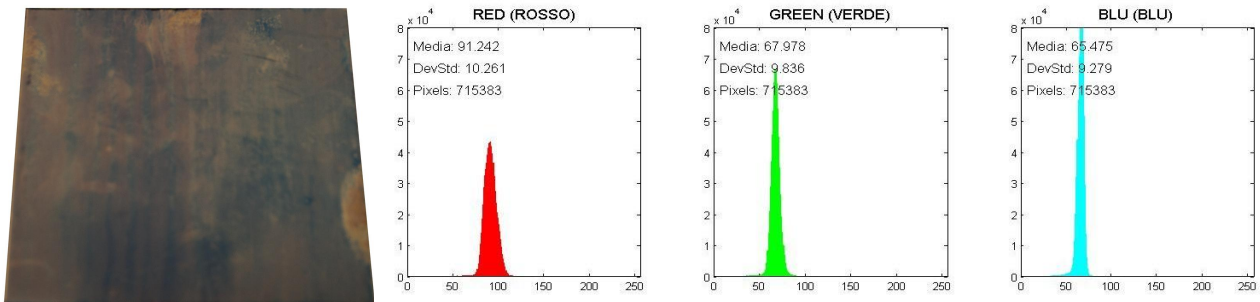


Fig. 4.314 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-B (campione 1).

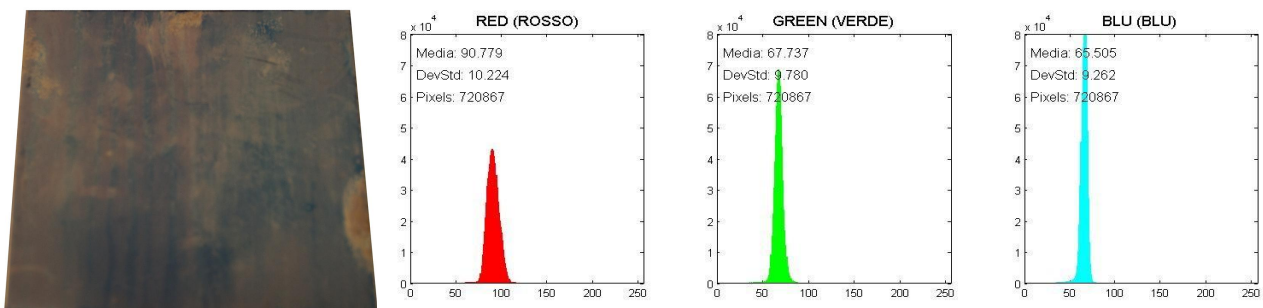


Fig. 4.315 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-B (campione 2).

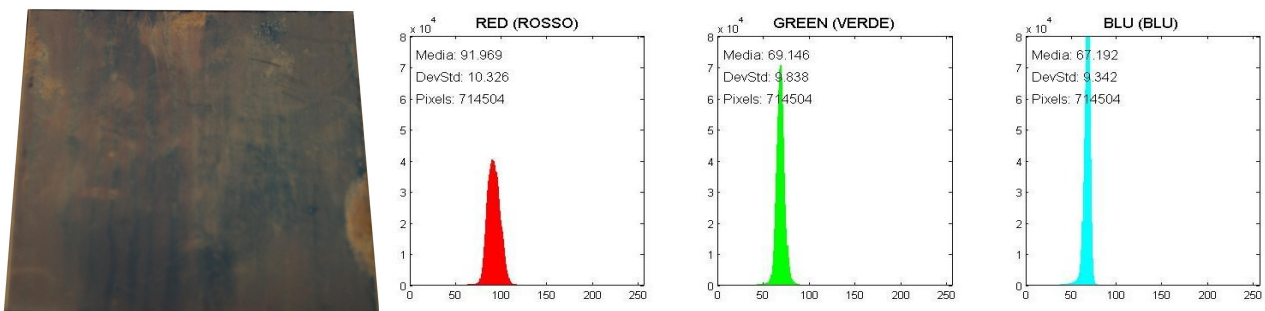


Fig. 4.316 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-B (campione 3).

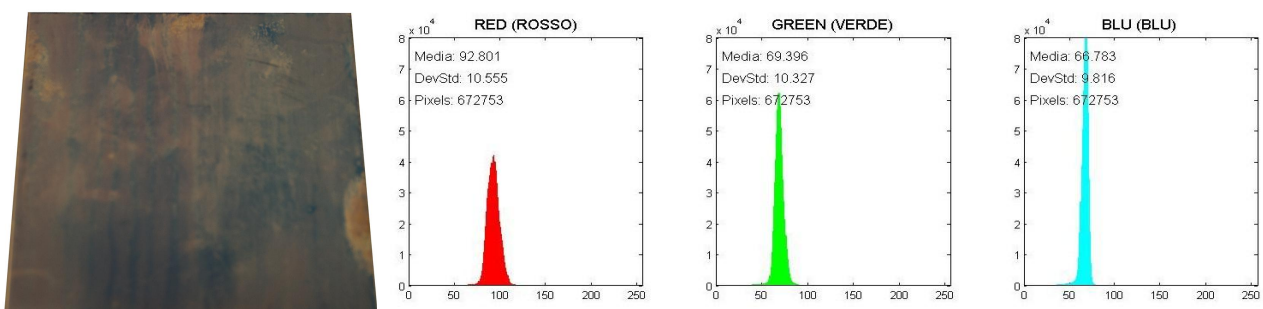


Fig. 4.317 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-1-316-06-B (campione 4).

# N-600-6-316-06-A:

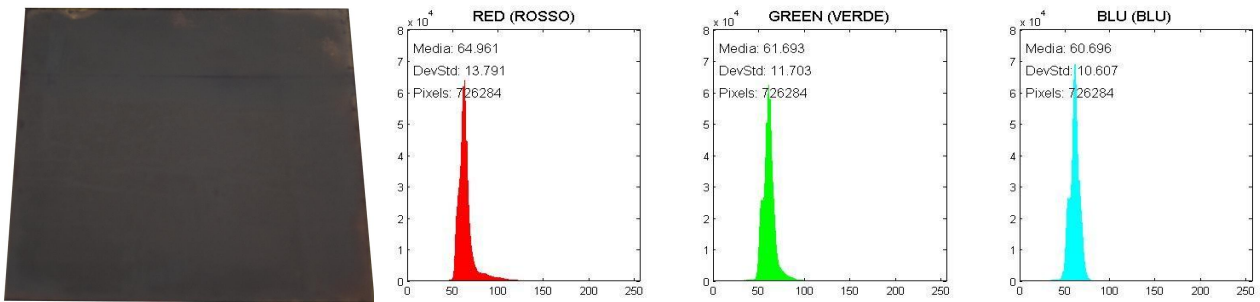


Fig. 4.318 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-A (campione 1).

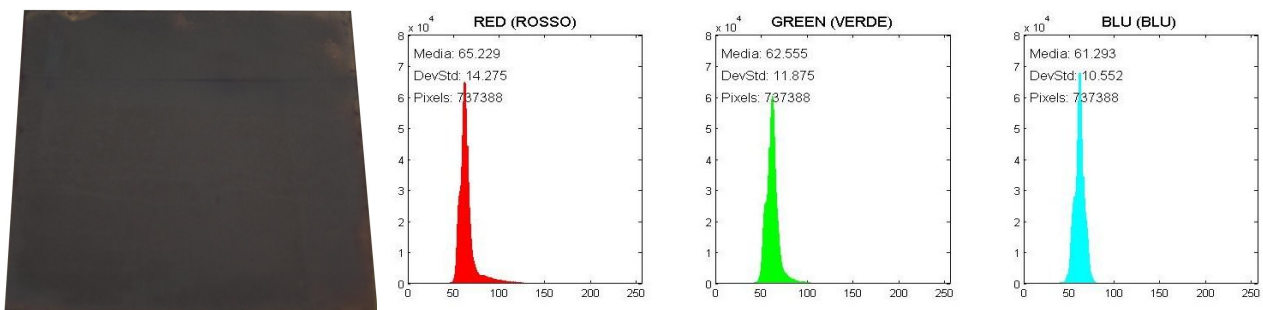


Fig. 4.319 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-A (campione 2).

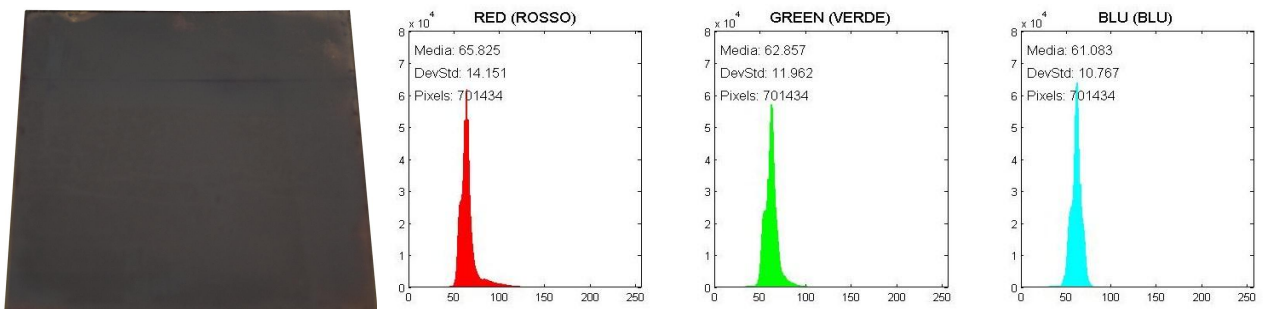


Fig. 4.320 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-A (campione 2).

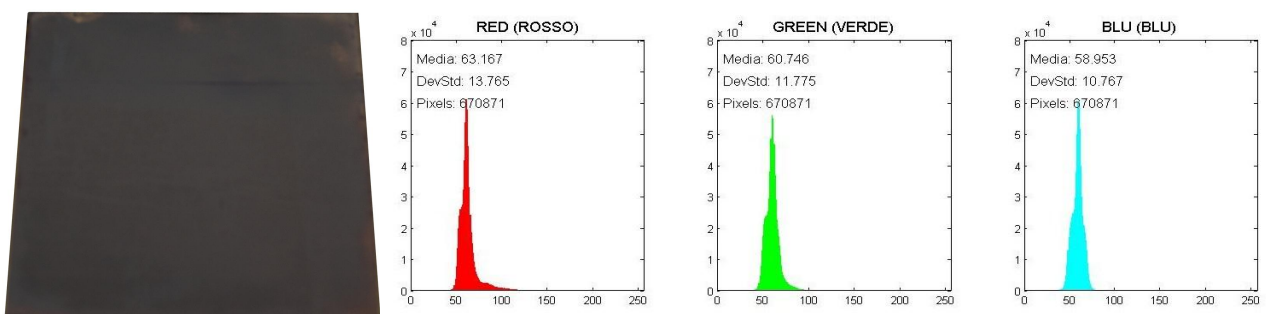


Fig. 4.321 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-A (campione 4).

# N-600-6-316-06-B:

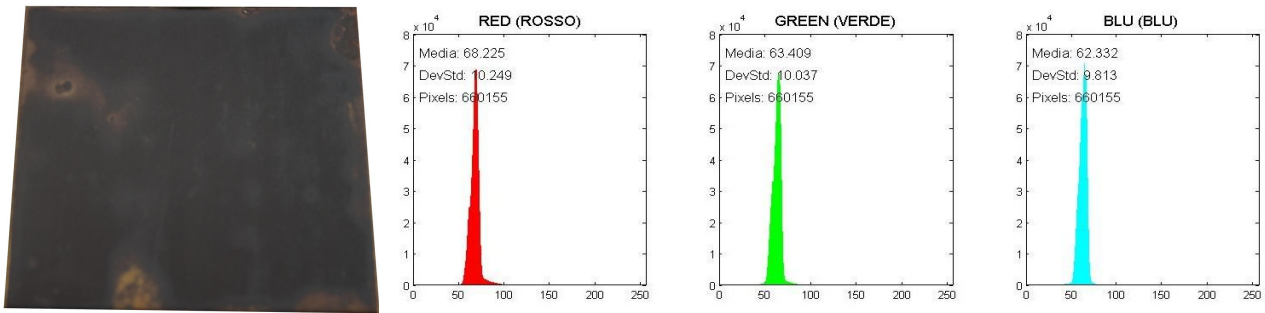


Fig. 4.322 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-B (campione 1).

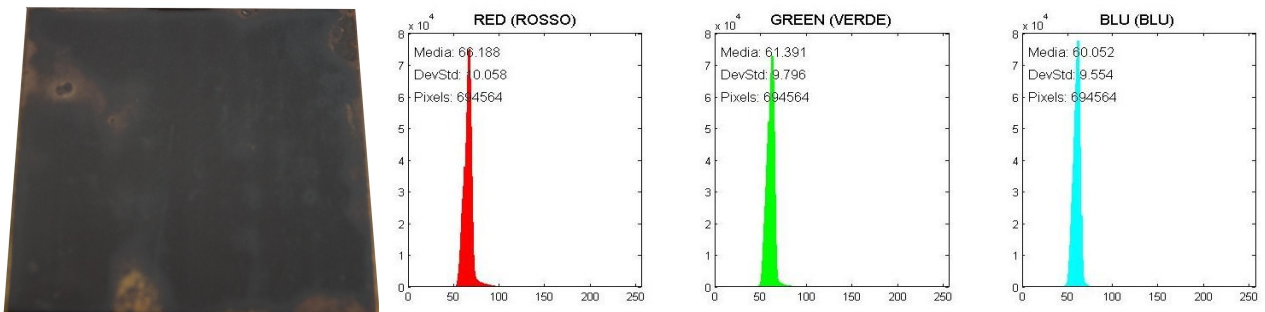


Fig. 4.323 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-B (campione 2).

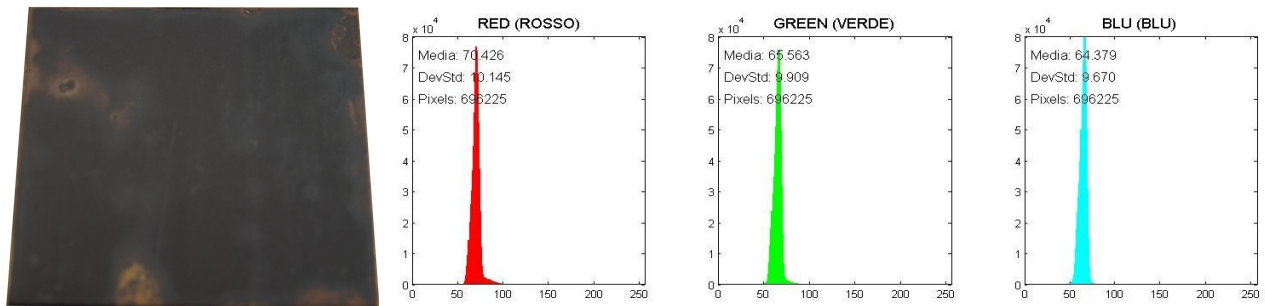


Fig. 4.324 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-B (campione 3).

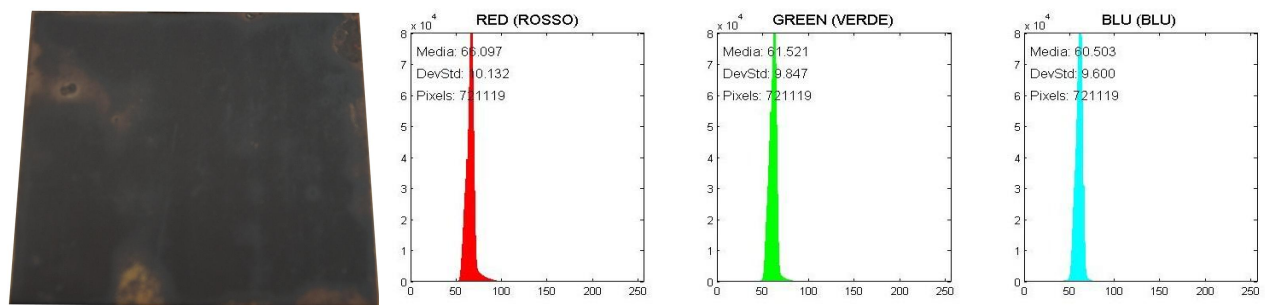


Fig. 4.325 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-600-6-316-06-B (campione 4).

# C-750-1-316-06-A:

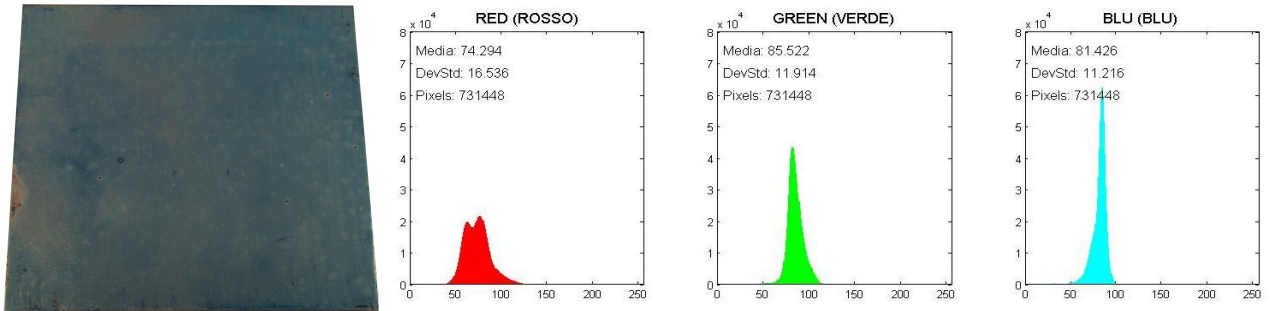


Fig. 4.326 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-A (campione 1).

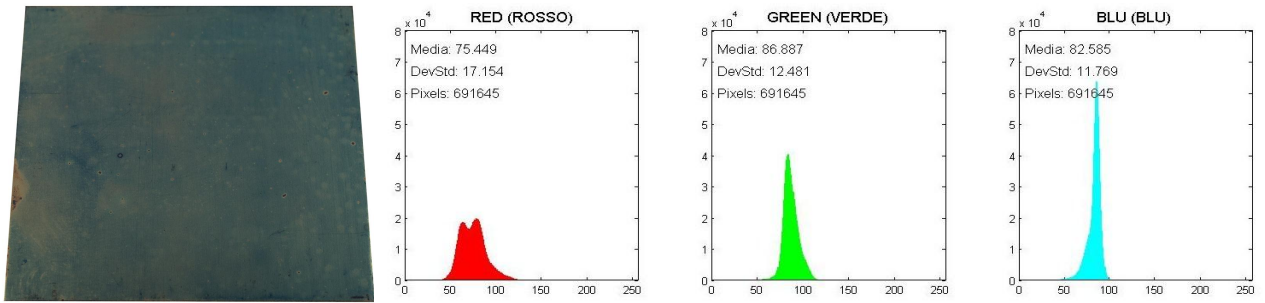


Fig. 4.327 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-A (campione 2).

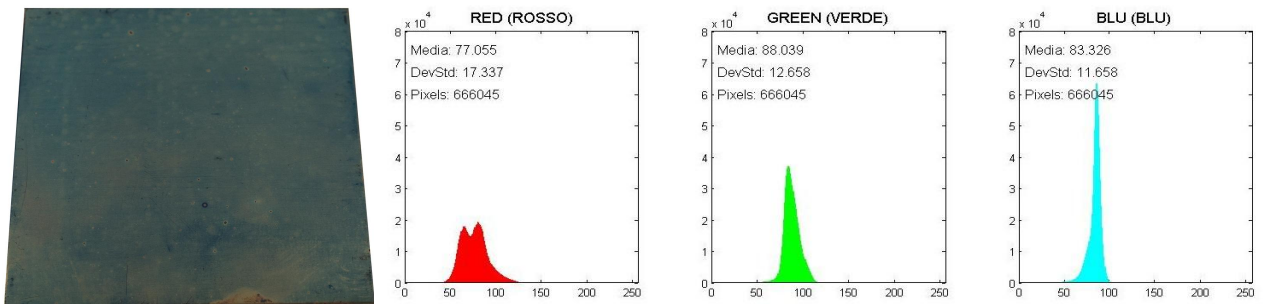


Fig. 4.328 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-A (campione 3).

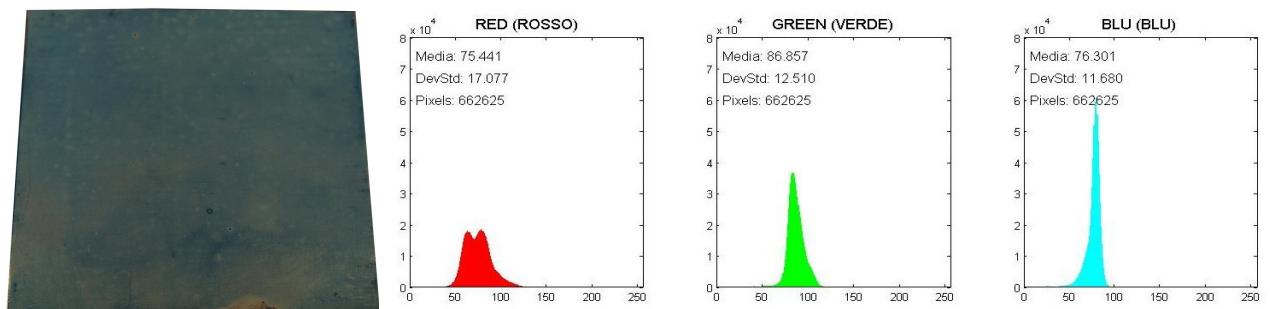


Fig. 4.329 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-A (campione 4).

## C-750-1-316-06-B:

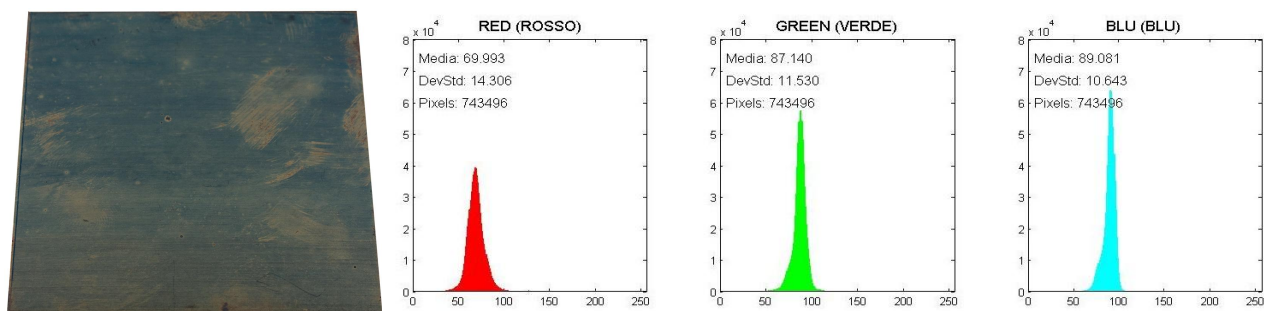


Fig. 4.330 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-B (campione 1).

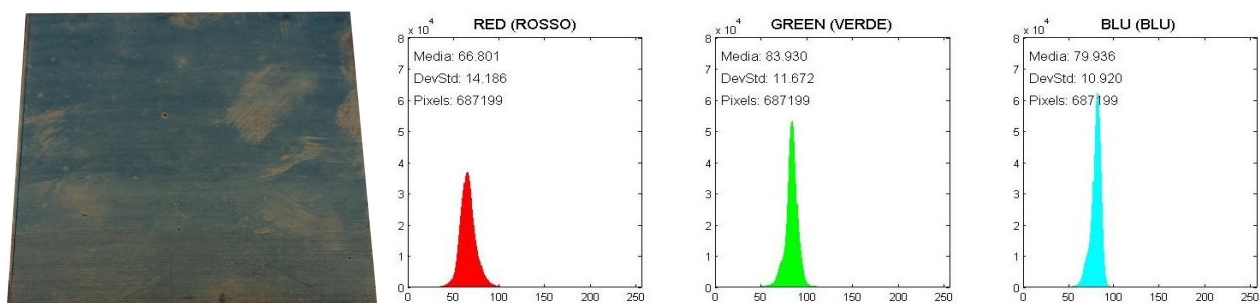


Fig. 4.331 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-B (campione 2).

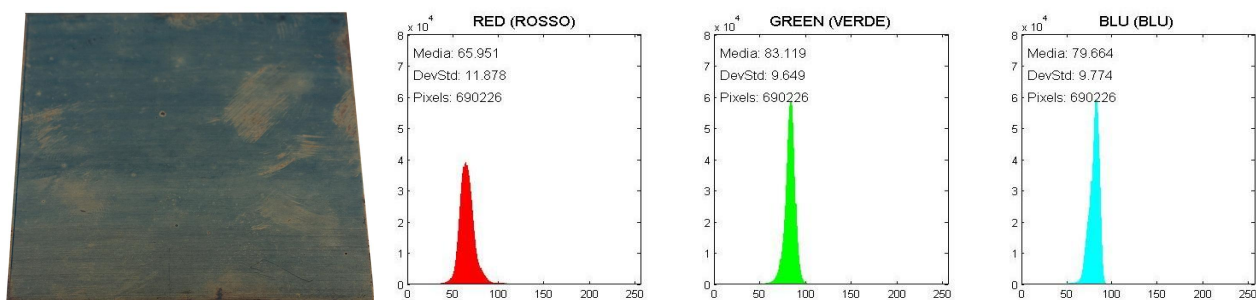


Fig. 4.332 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-B (campione 3).

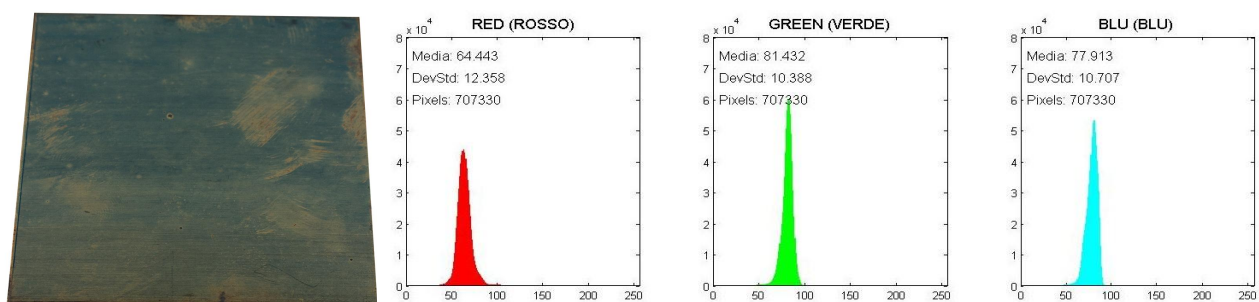


Fig. 4.333 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-1-316-06-B (campione 4).

# C-750-6-316-06-A:

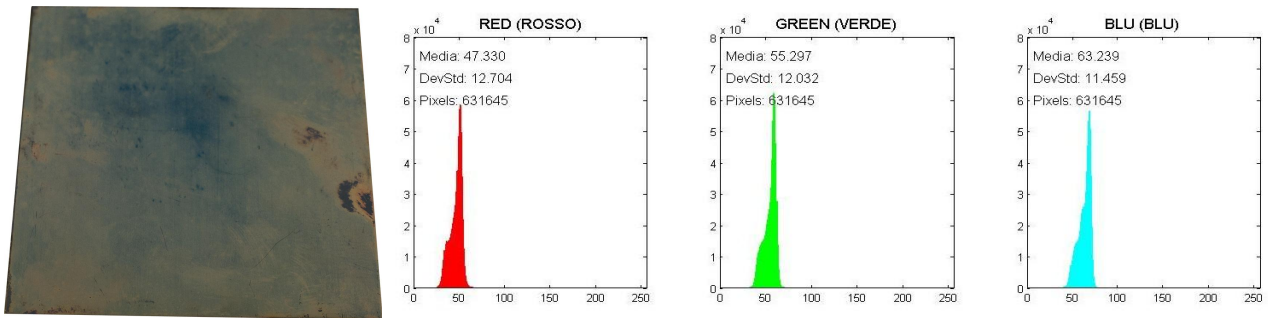


Fig. 4.334 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-A (campione 1).

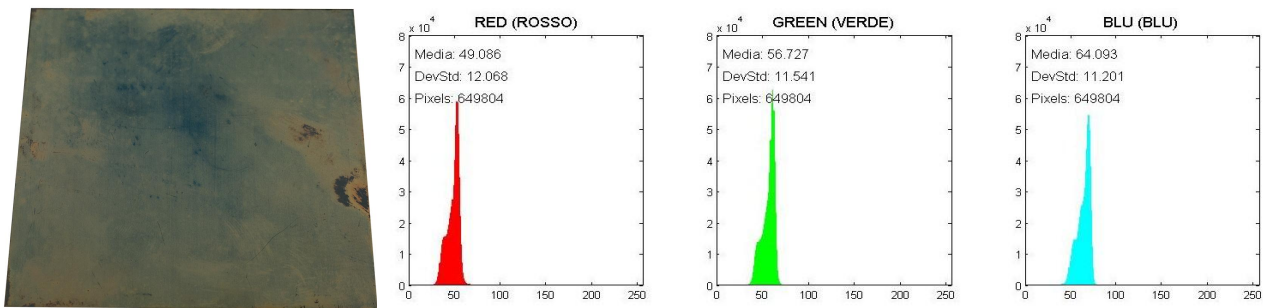


Fig. 4.335 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-A (campione 2).

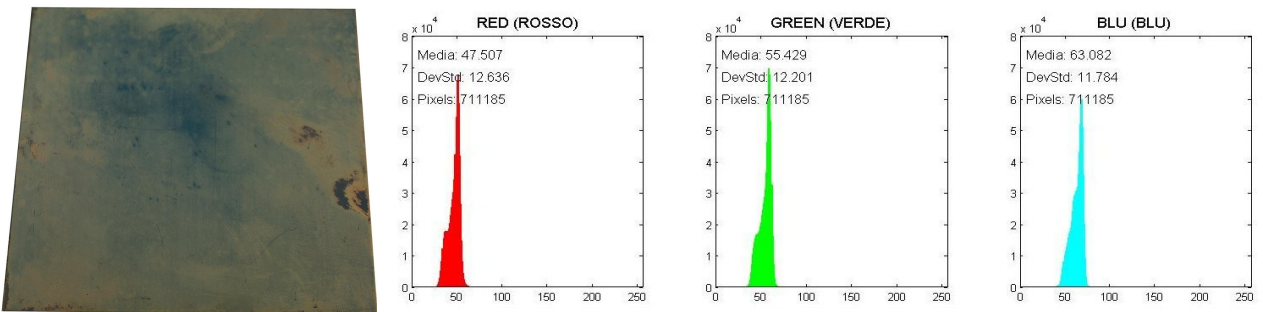


Fig. 4.336 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-A (campione 3).

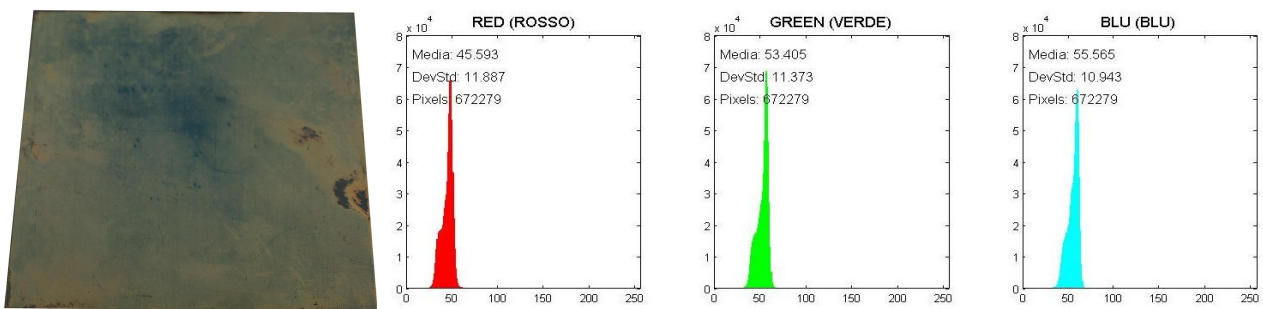


Fig. 4.337 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-A (campione 4).

## C-750-6-316-06-B:

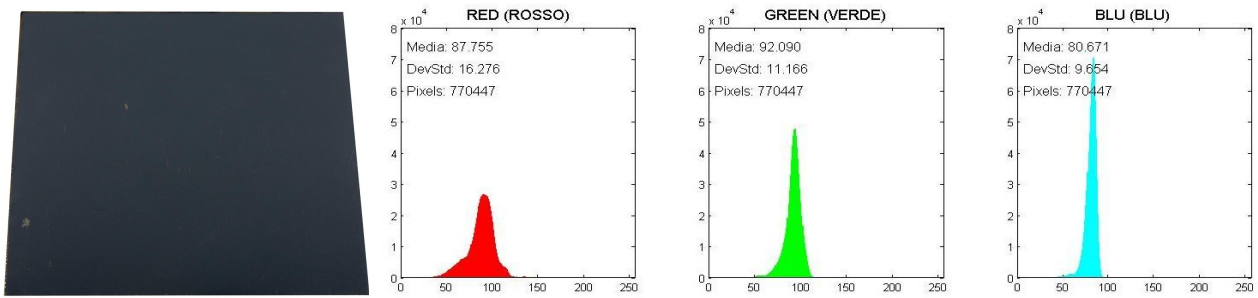


Fig. 4.338 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-B (campione 1).

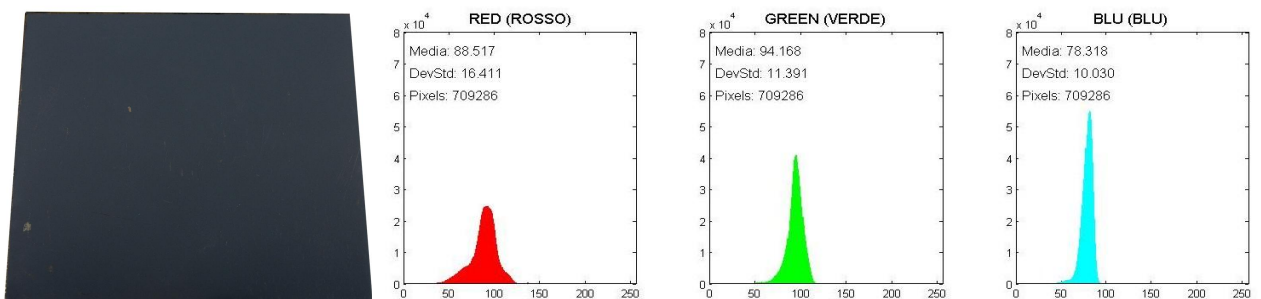


Fig. 4.339 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-B (campione 2).

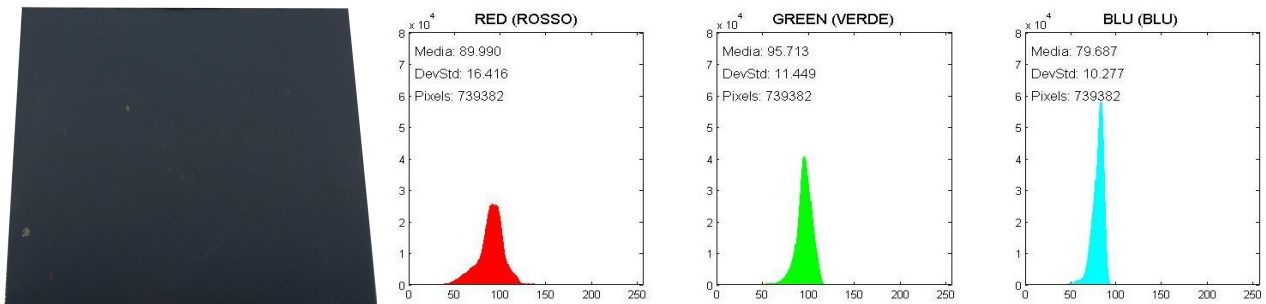


Fig. 4.340 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-B (campione 3).

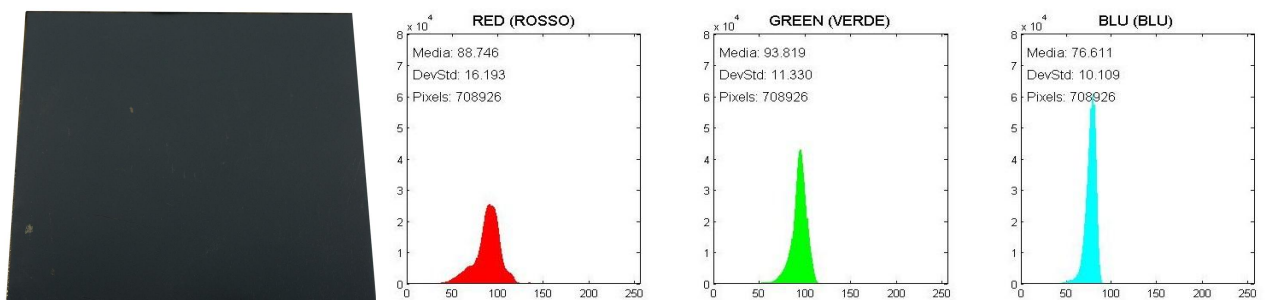


Fig. 4.341 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-750-6-316-06-B (campione 4).

# N-750-1-316-06-A:

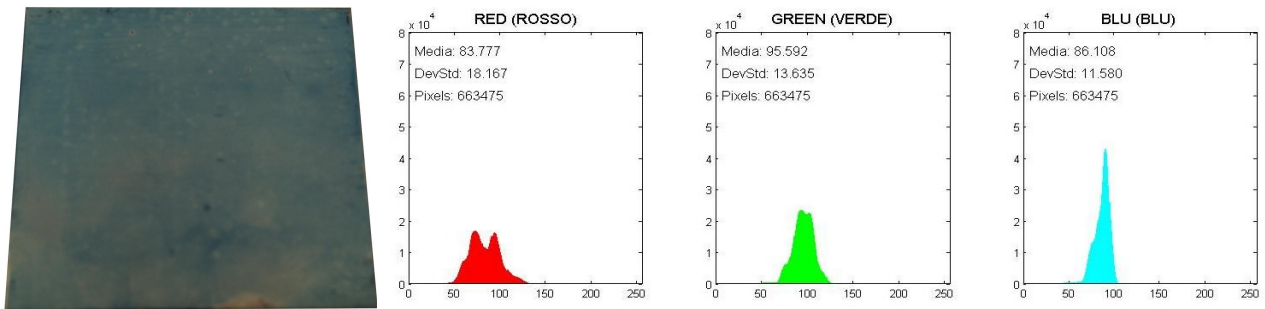


Fig. 4.342 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-A (campione 1).

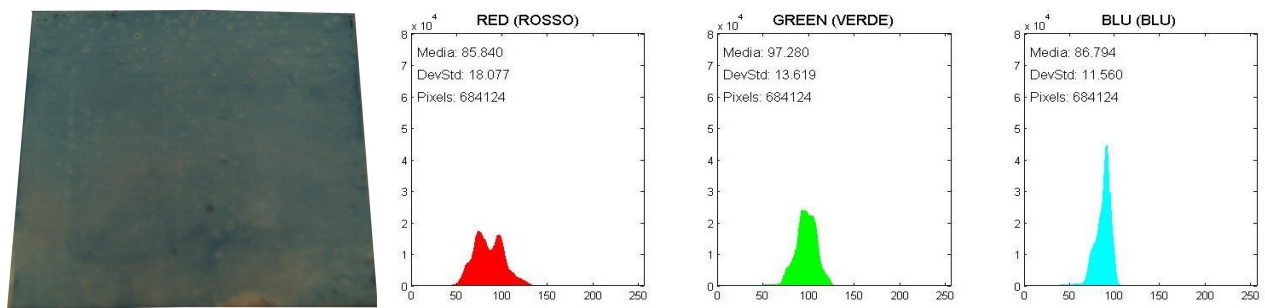


Fig. 4.343 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-A (campione 2).

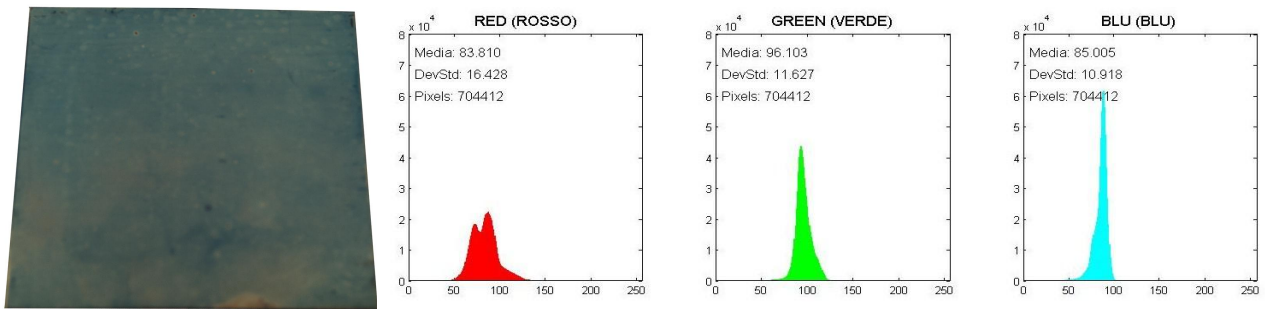


Fig. 4.344 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-A (campione 3).

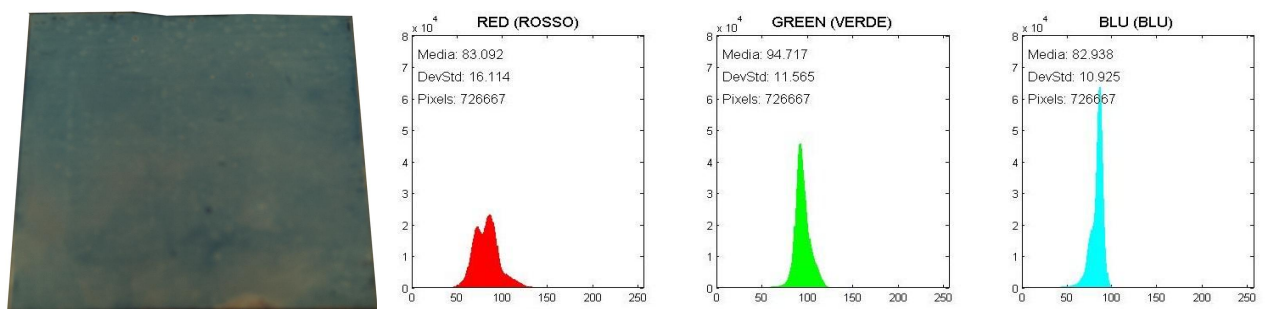


Fig. 4.345 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-A (campione 4).



# N-750-1-316-06-B:

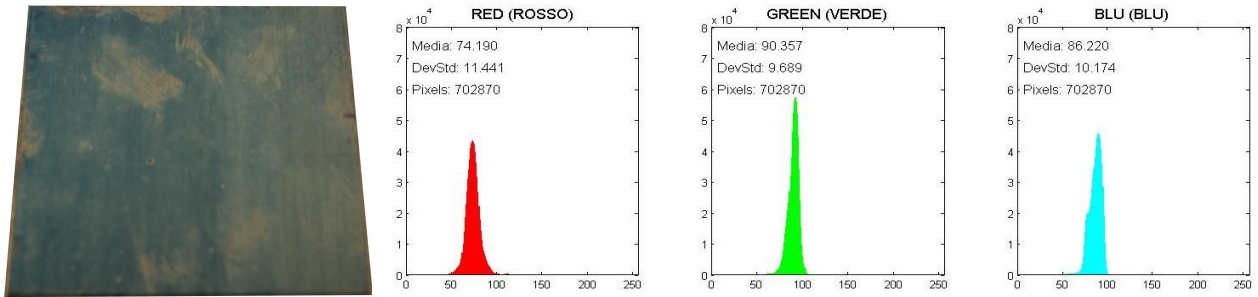


Fig. 4.346 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-B (campione 1).

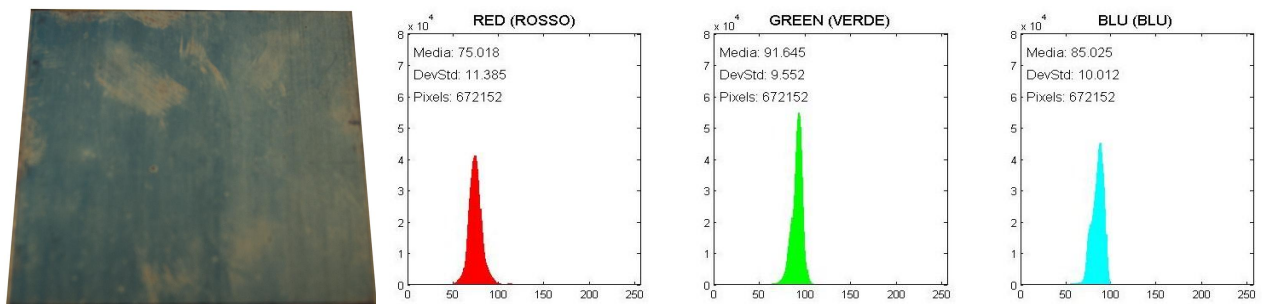


Fig. 4.347 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-B (campione 2).

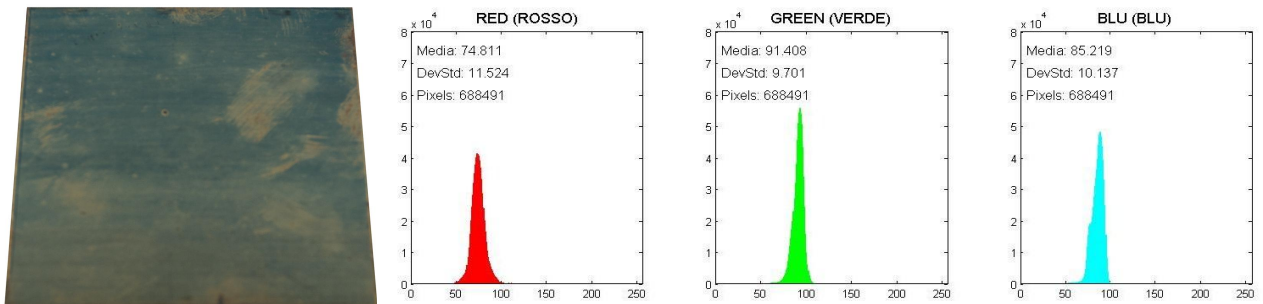


Fig. 4.348 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-B (campione 3).

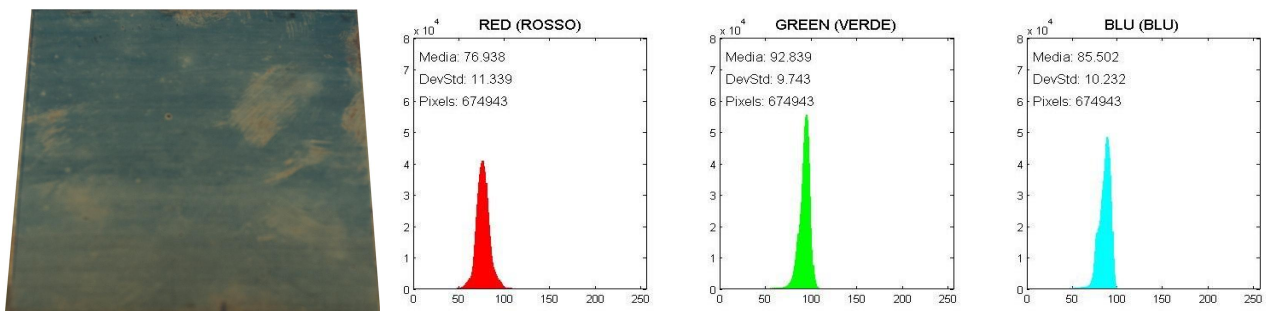


Fig. 4.349 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-1-316-06-B (campione 4).

# N-750-6-316-06-A:

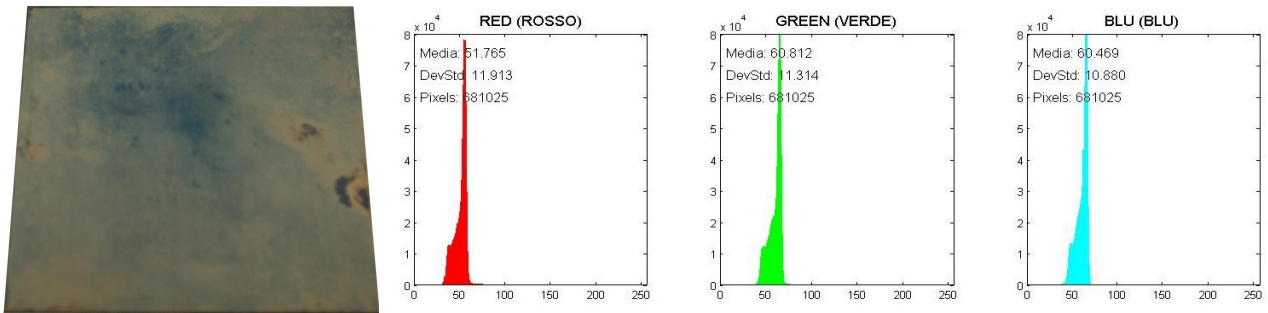


Fig. 4.350 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-A (campione 1).

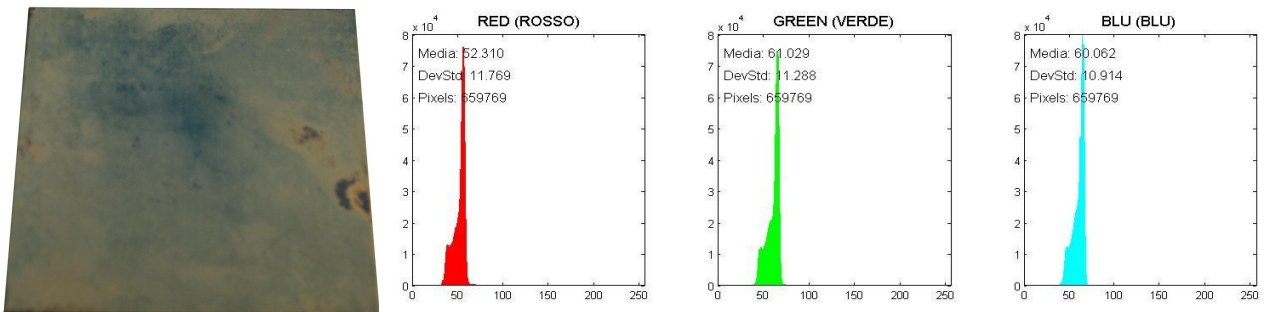


Fig. 4.351 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-A (campione 2).

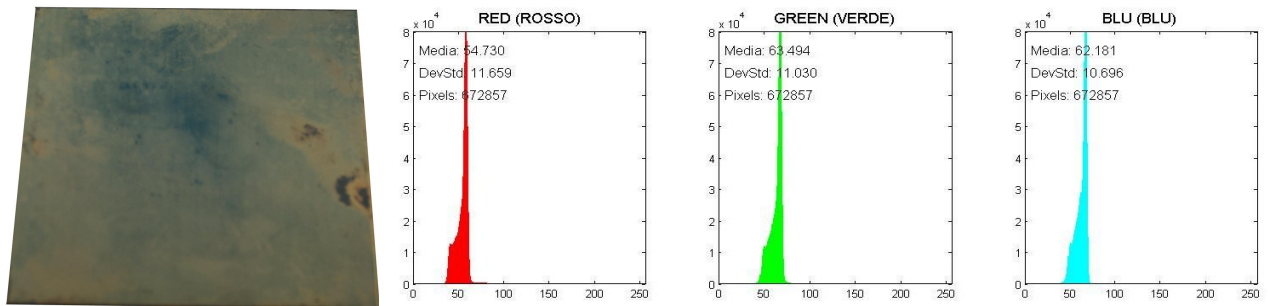


Fig. 4.352 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-A (campione 3).

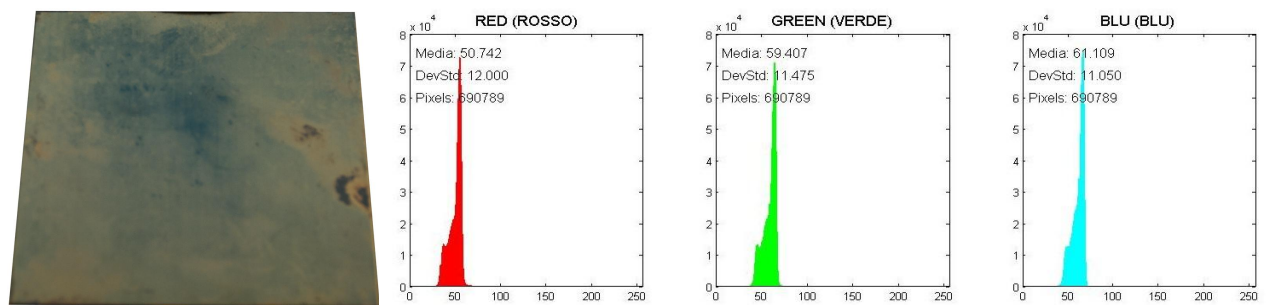


Fig. 4.353 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-A (campione 4).

# N-750-6-316-06-B:

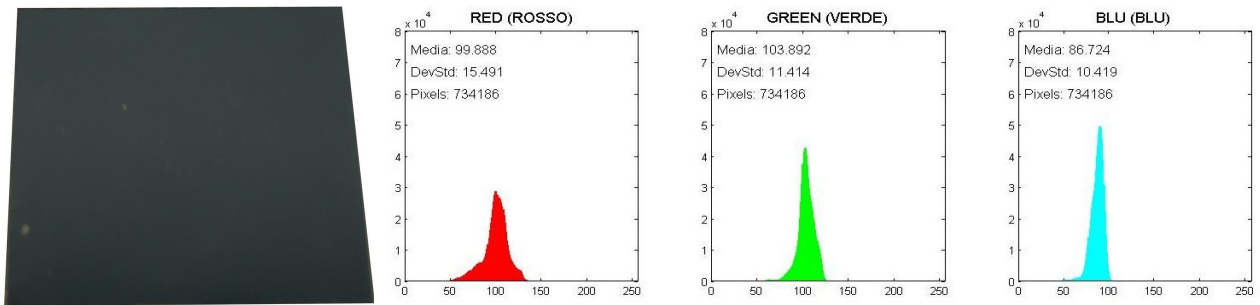


Fig. 4.354 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-B (campione 1).

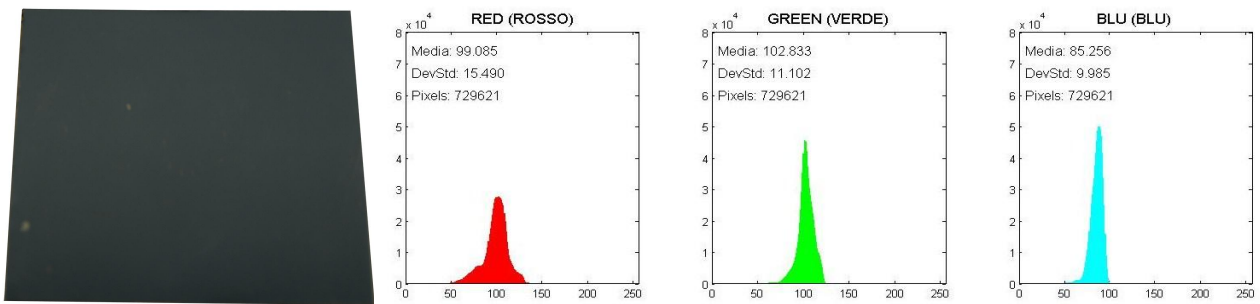


Fig. 4.355 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-B (campione 2).

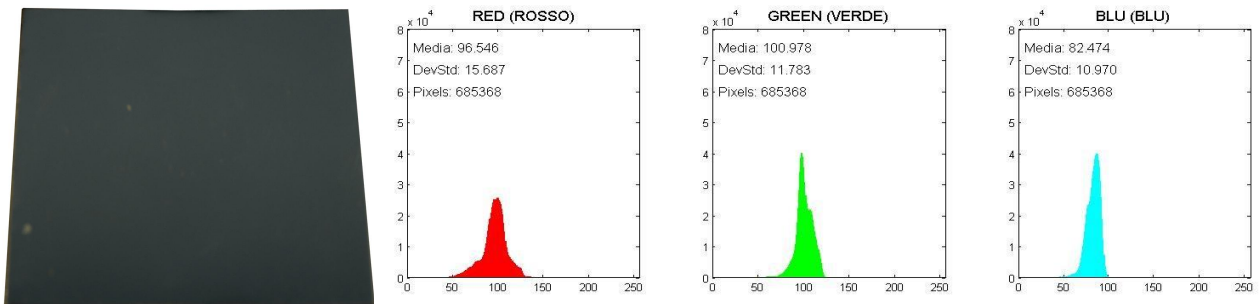


Fig. 4.356 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-B (campione 3).

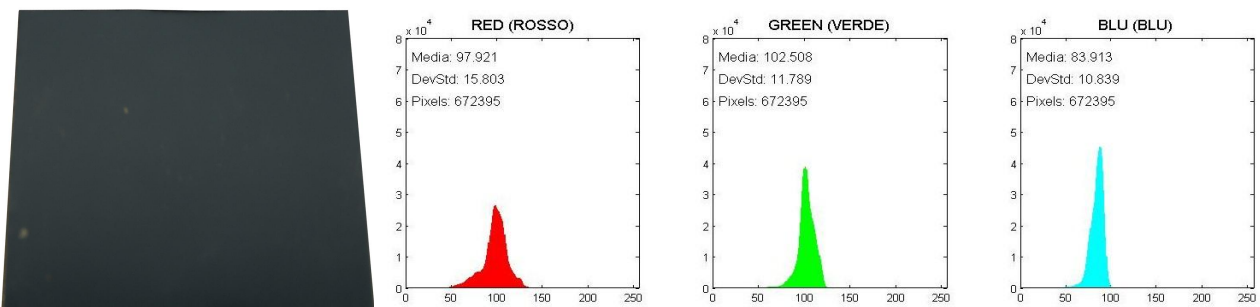


Fig. 4.357 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-750-6-316-06-B (campione 4).

# C-900-1-316-06-A:

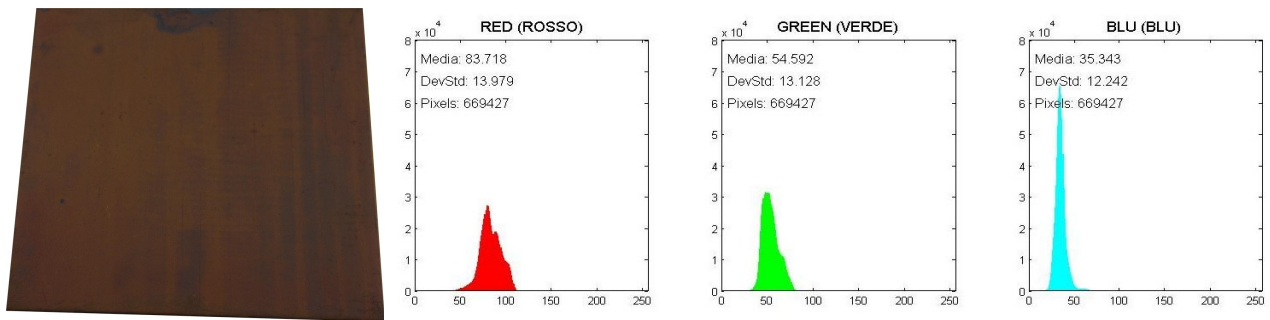


Fig. 4.358 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-A (campione 1).

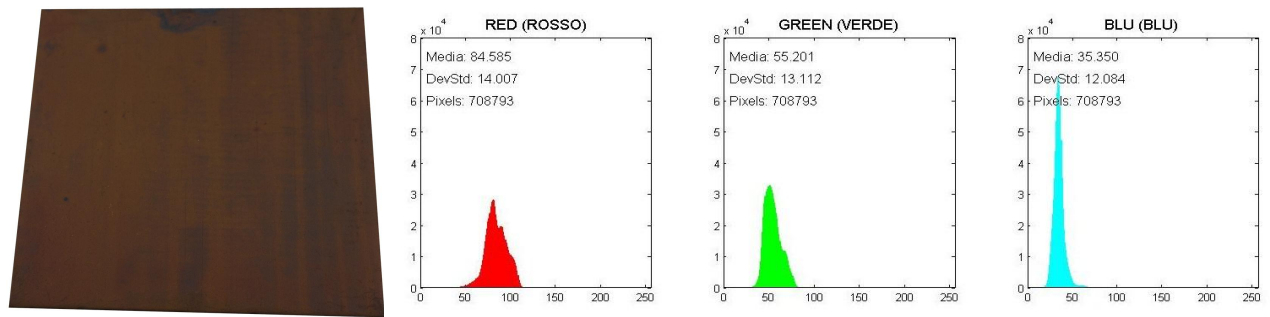


Fig. 4.359 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-A (campione 2).

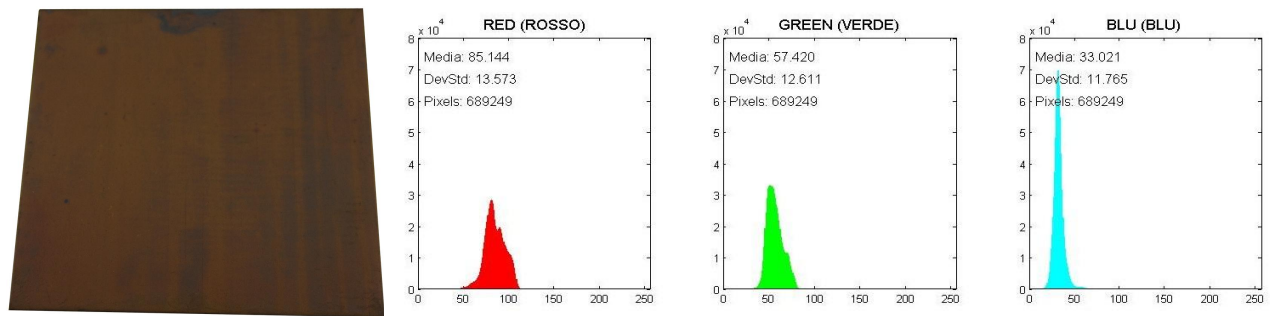


Fig. 4.360 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-A (campione 3).

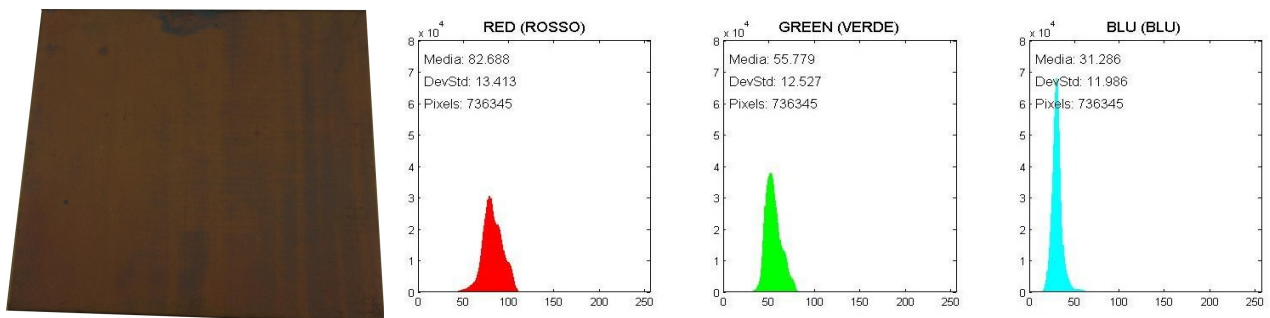


Fig. 4.361 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-A (campione 4).

## C-900-1-316-06-B:

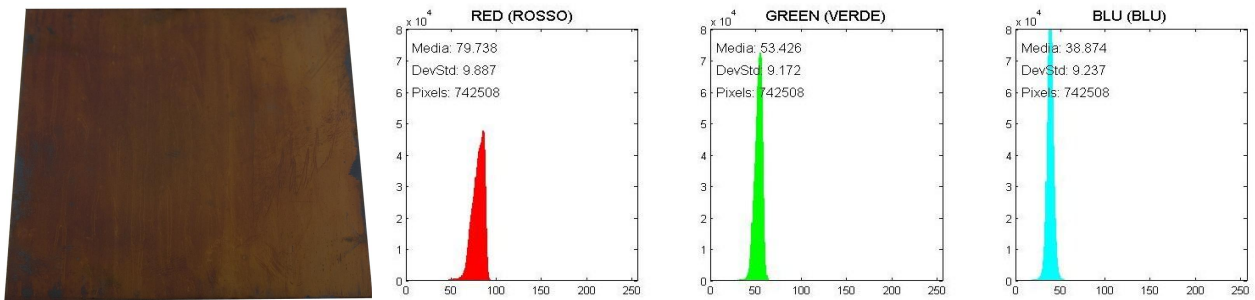


Fig. 4.362 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-B (campione 1).

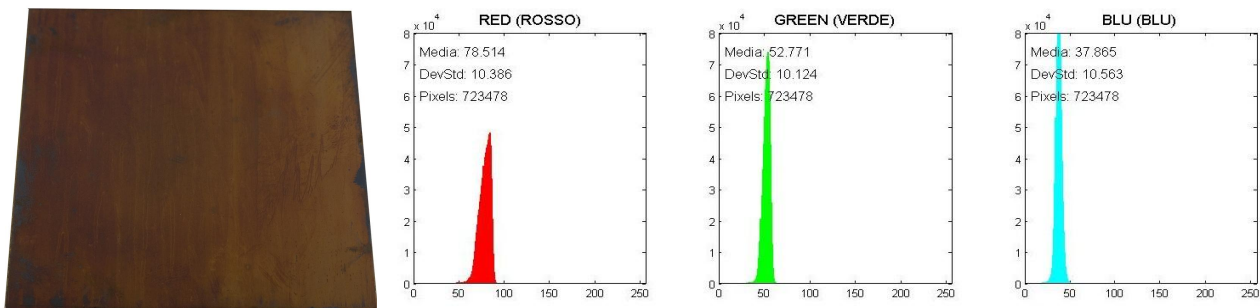


Fig. 4.363 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-B (campione 2).

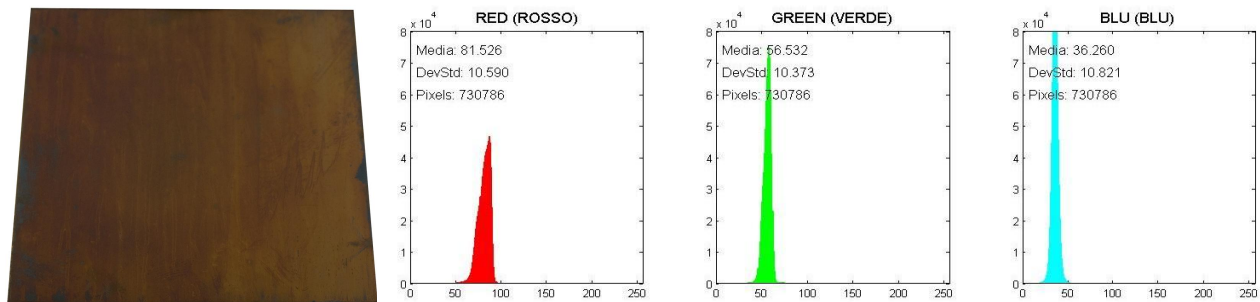


Fig. 4.364 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-B (campione 3).

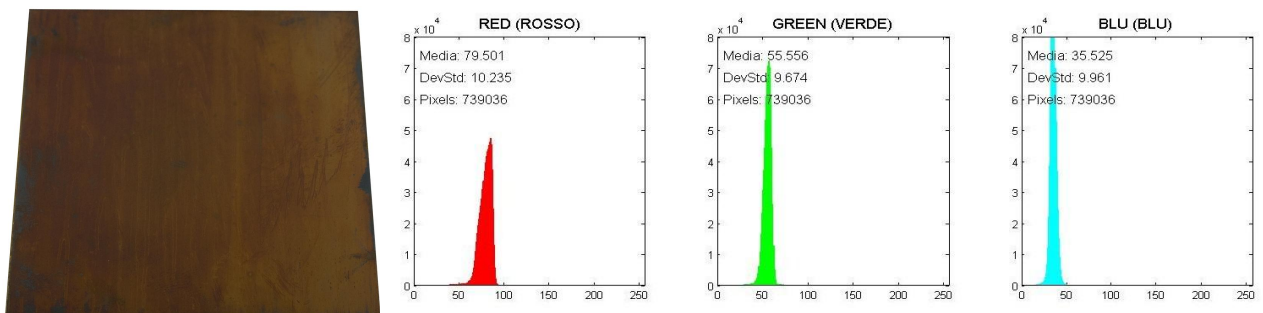


Fig. 4.365 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-1-316-06-B (campione 4).

# C-900-6-316-06-A:

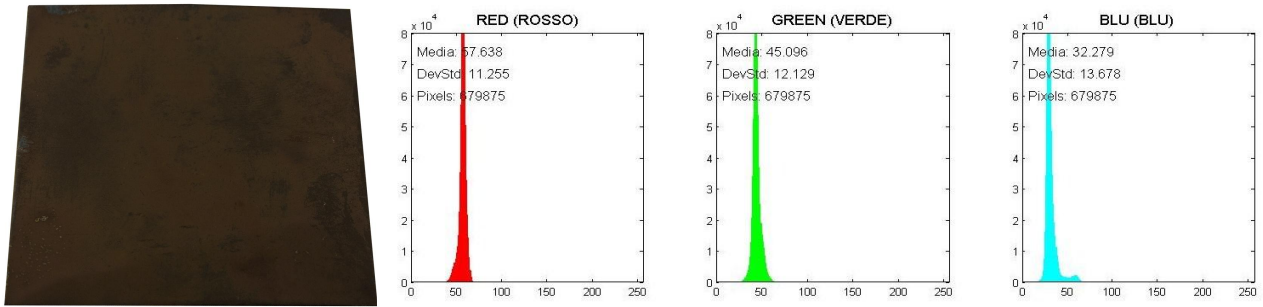


Fig. 4.366 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-A (campione 1).

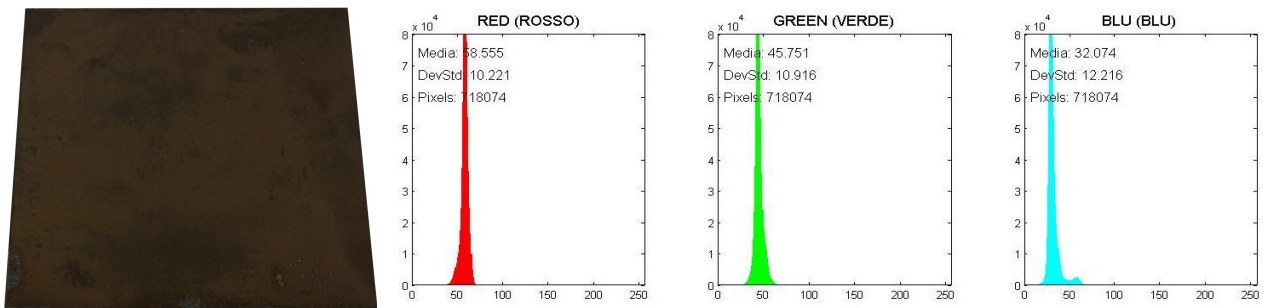


Fig. 4.367 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-A (campione 2).

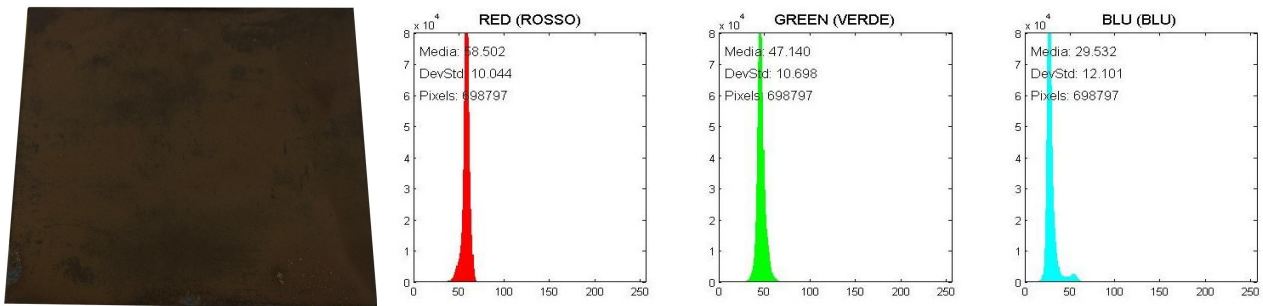


Fig. 4.368 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-A (campione 3).

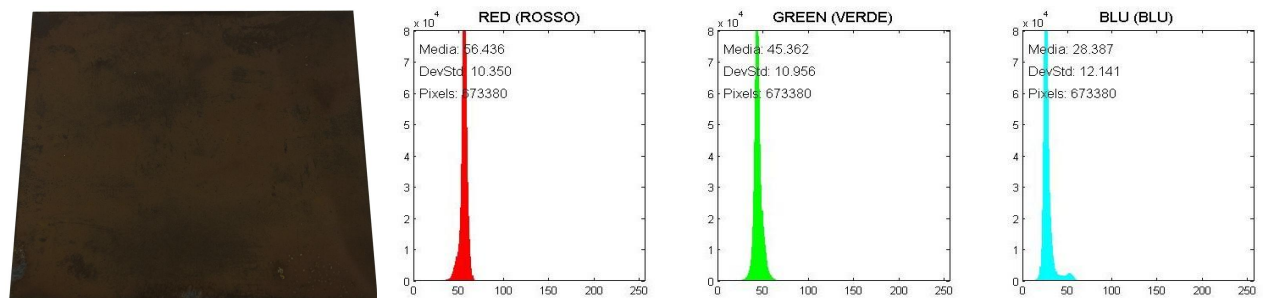


Fig. 4.369 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-A (campione 4).

# C-900-6-316-06-B:

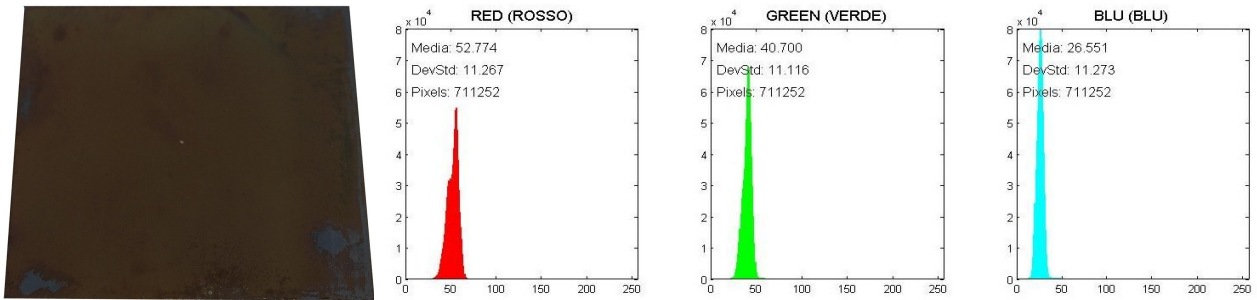


Fig. 4.370 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-B (campione 1).

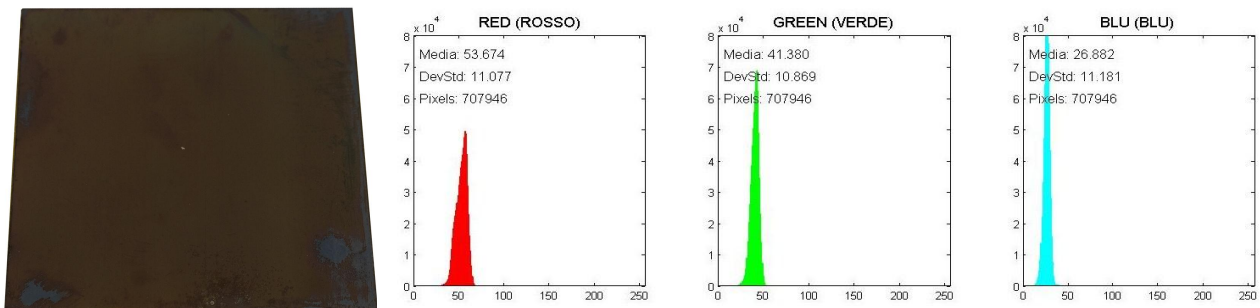


Fig. 4.371 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-B (campione 2).

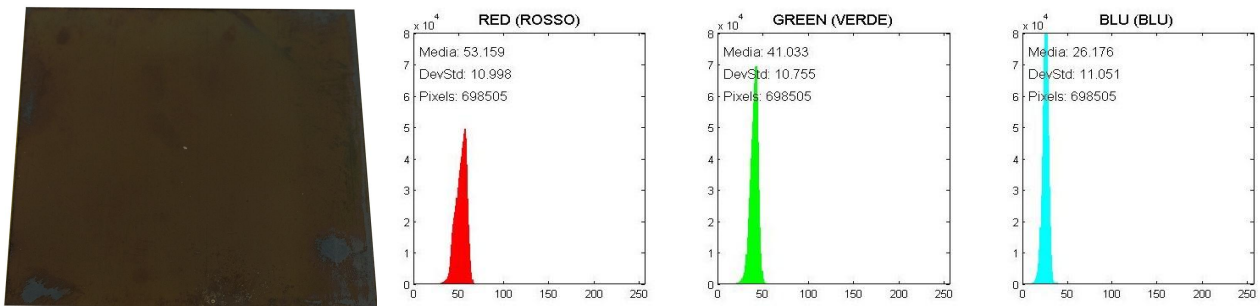


Fig. 4.372 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-B (campione 3).

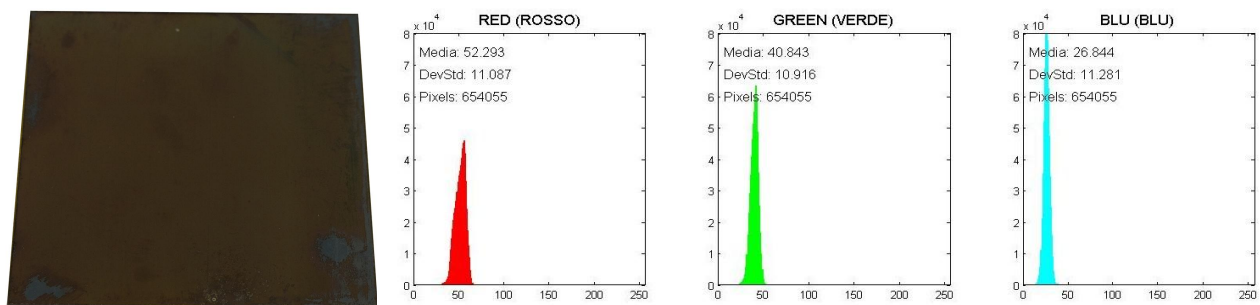


Fig. 4.373 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-900-6-316-06-B (campione 4).

# N-900-1-316-06-A:

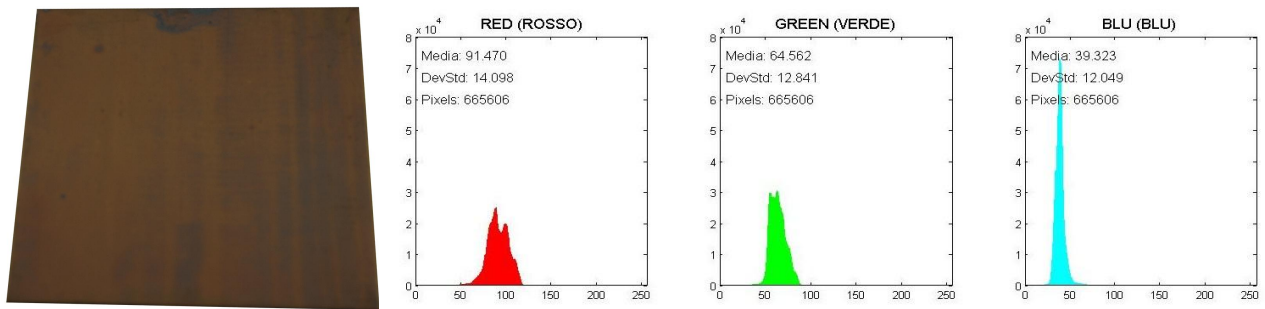


Fig. 4.374 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-A (campione 1).

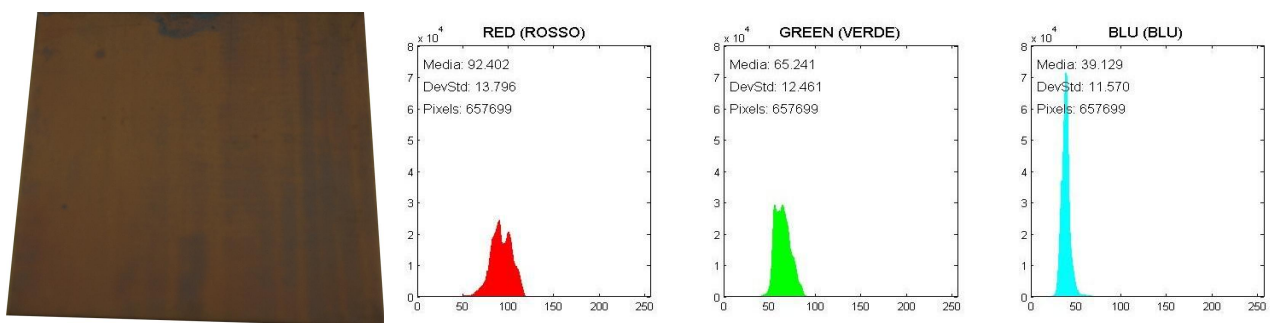


Fig. 4.375 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-A (campione 2).

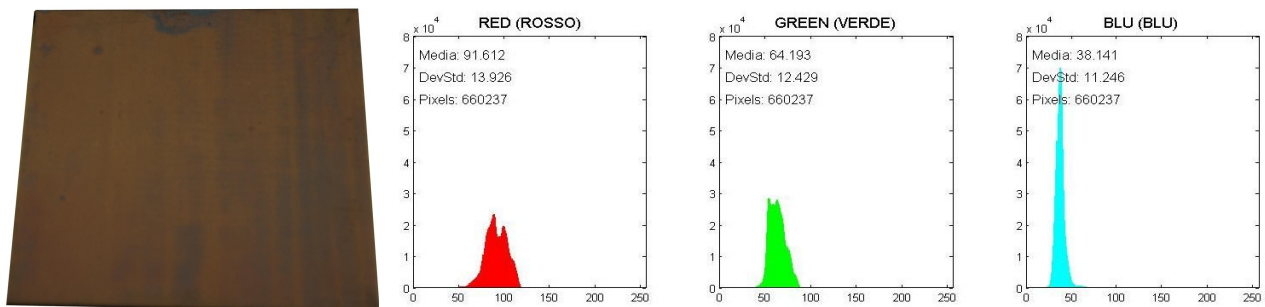


Fig. 4.376 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-A (campione 3).

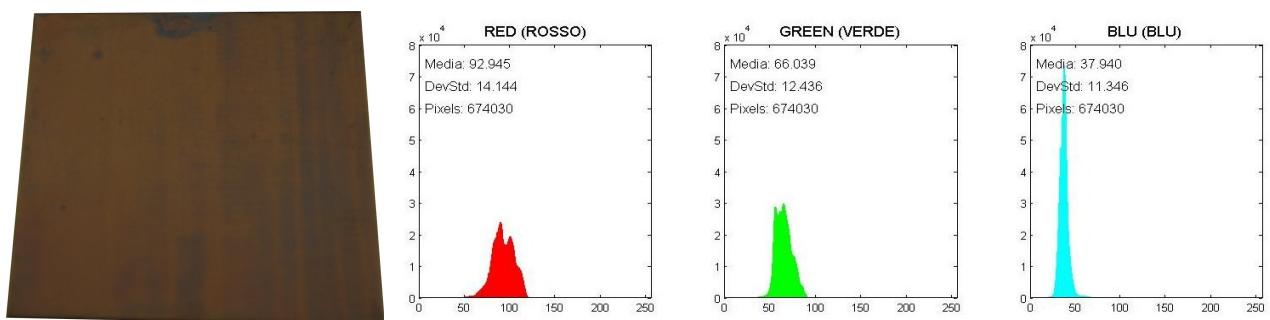


Fig. 4.377 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-A (campione 4).



# N-900-1-316-06-B:

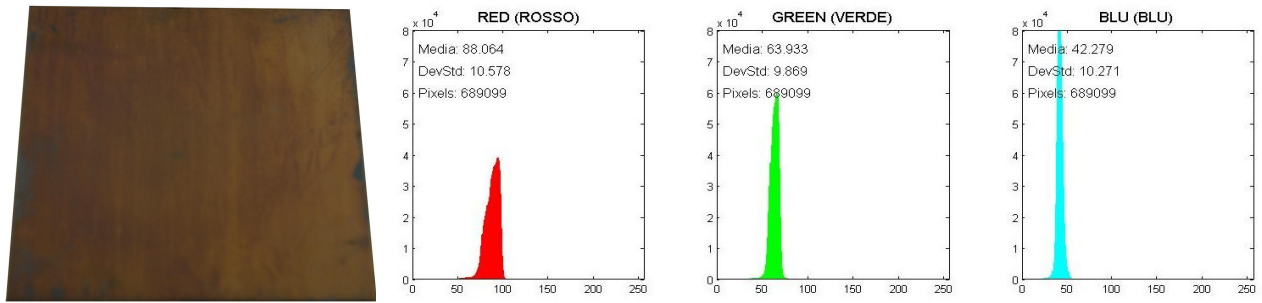


Fig. 4.378 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-B (campione 1).

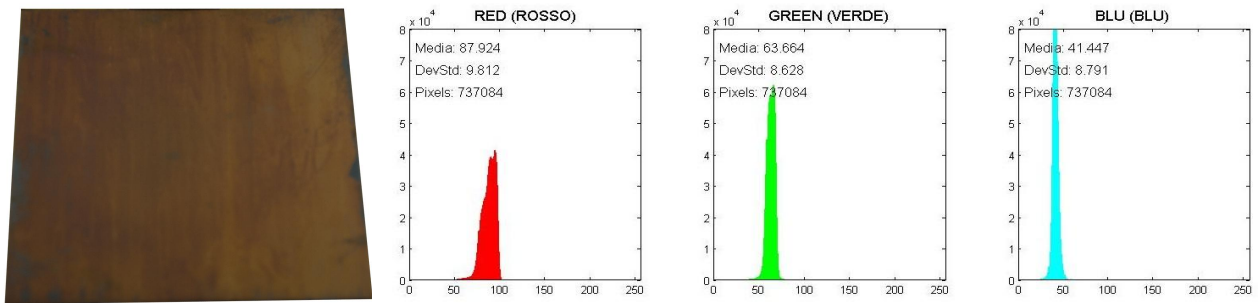


Fig. 4.379 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-B (campione 2).

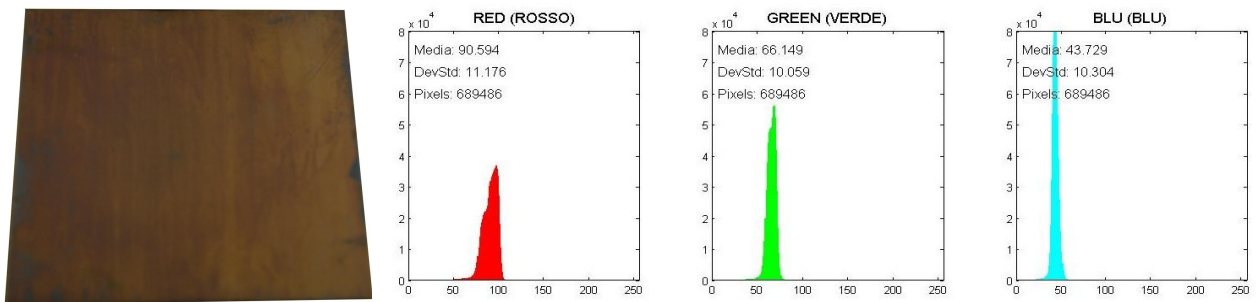


Fig. 4.380 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-B (campione 3).

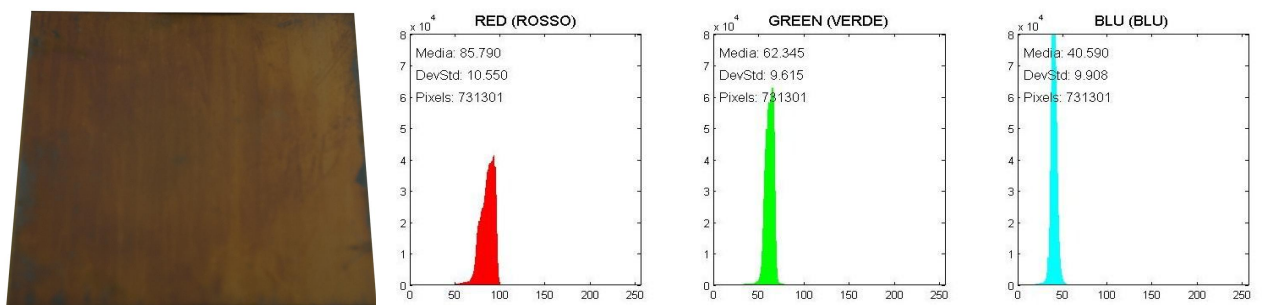


Fig. 4.381 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-1-316-06-B (campione 4).

# N-900-6-316-06-A:

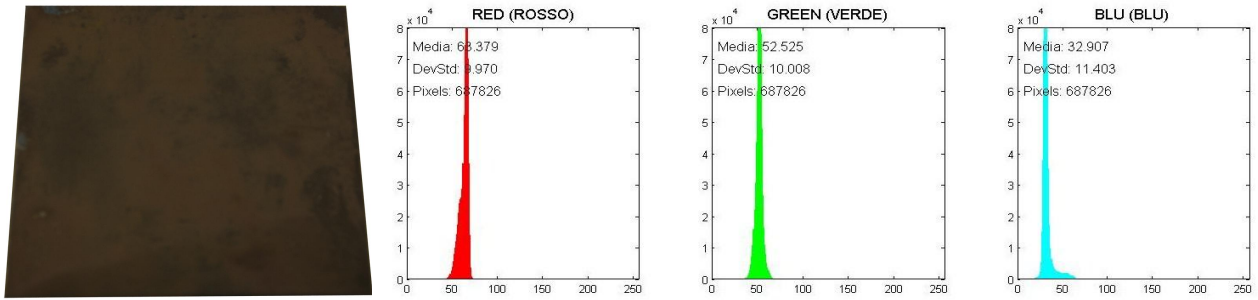


Fig. 4.382 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-A (campione 1).

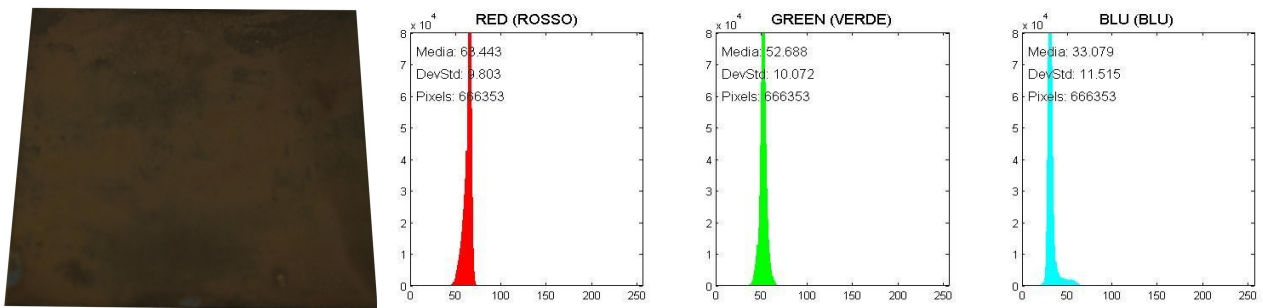


Fig. 4.383 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-A (campione 2).

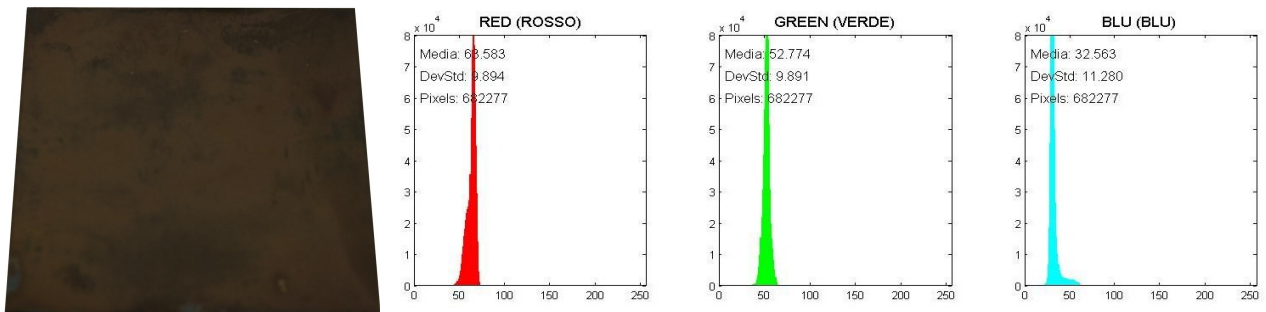


Fig. 4.384 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-A (campione 3).

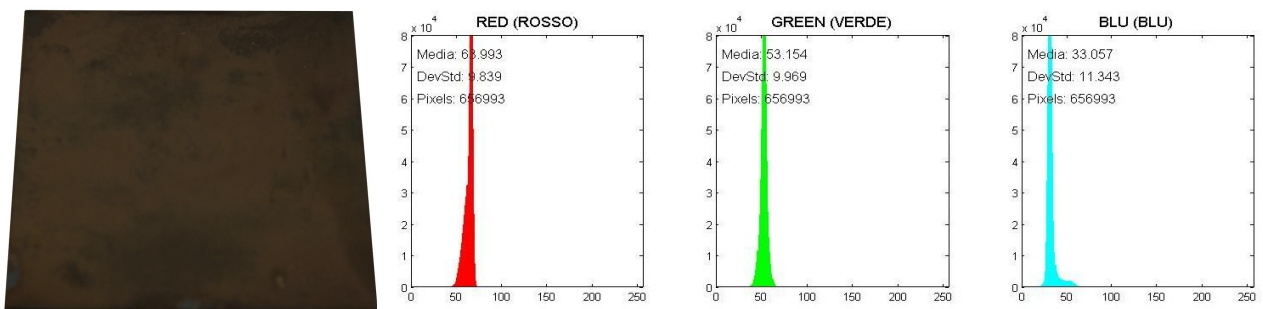


Fig. 4.385 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-A (campione 4).

# N-900-6-316-06-B:

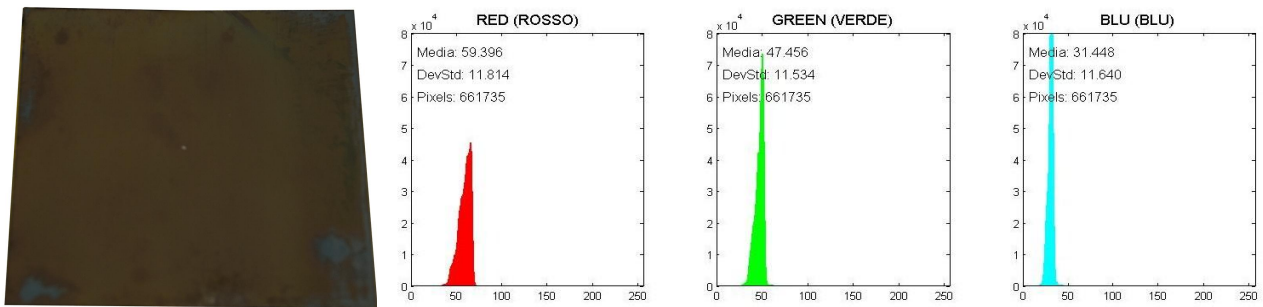


Fig. 4.386 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 1).

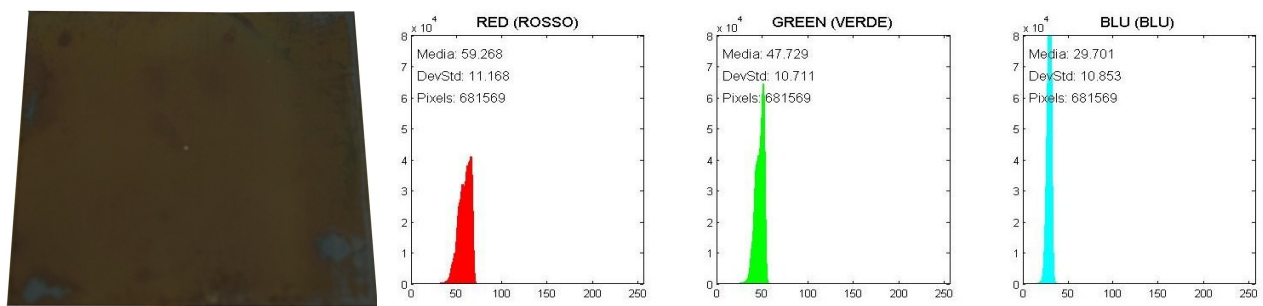


Fig. 4.387 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 2).

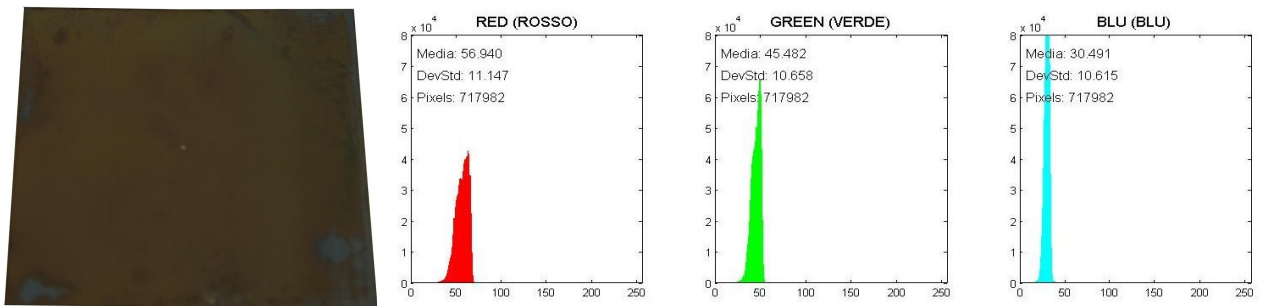


Fig. 4.388 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 3).

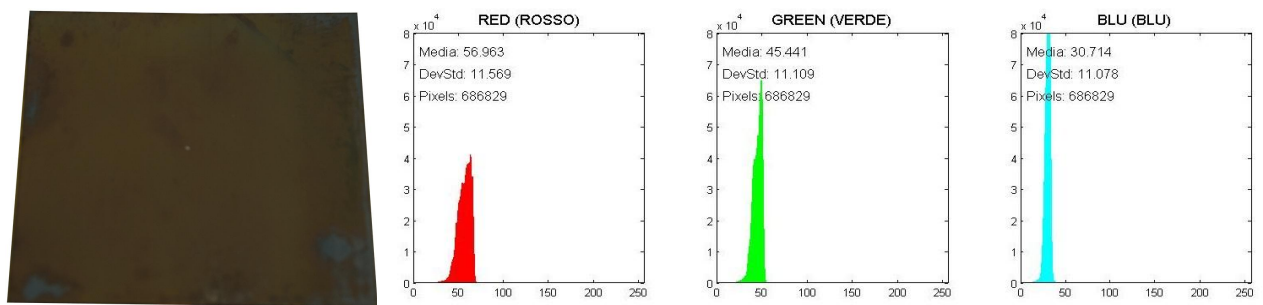


Fig. 4.389 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-900-6-316-06-B (campione 4).

# C-1050-1-316-06-A:

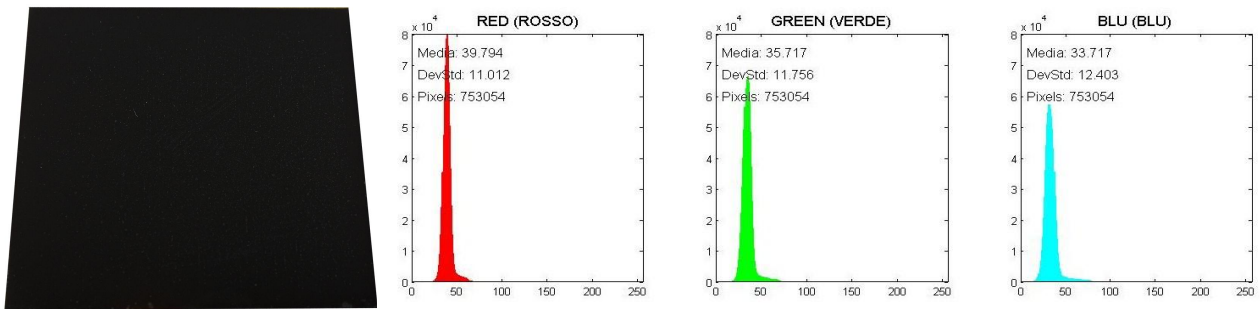


Fig. 4.390 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 1).

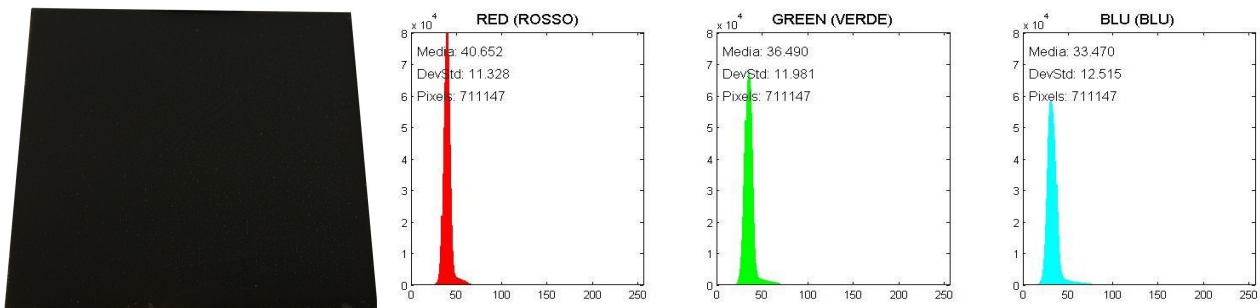


Fig. 4.391 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 2).

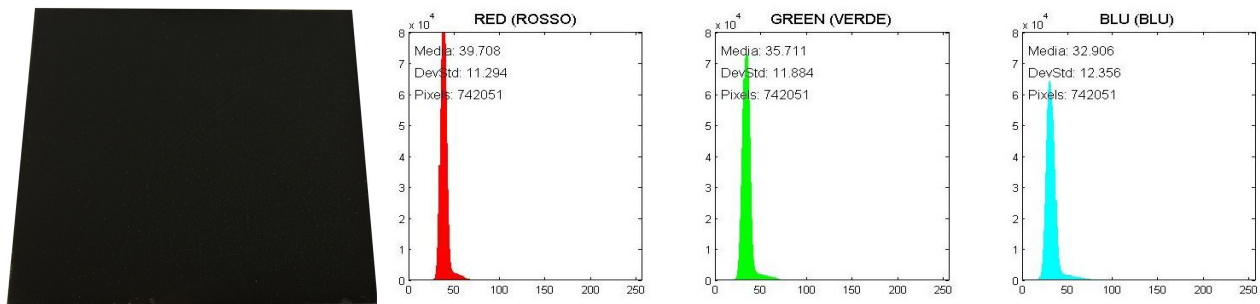


Fig. 4.392 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 3).

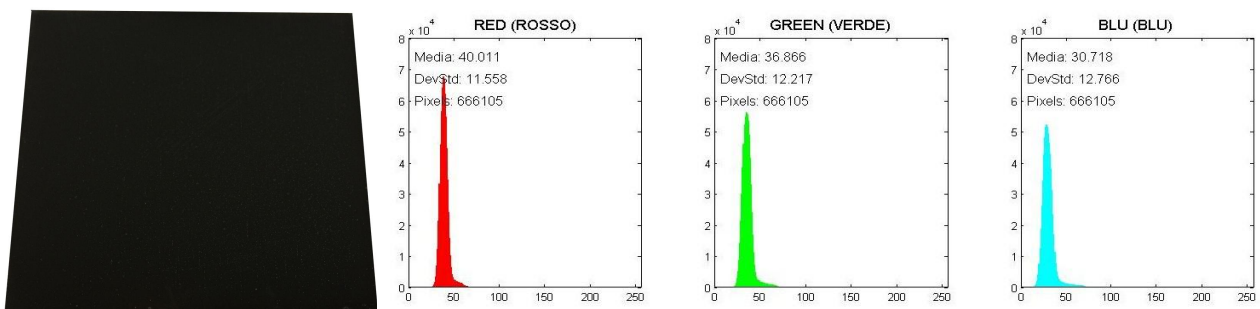


Fig. 4.393 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-A (campione 4).

## C-1050-1-316-06-B:

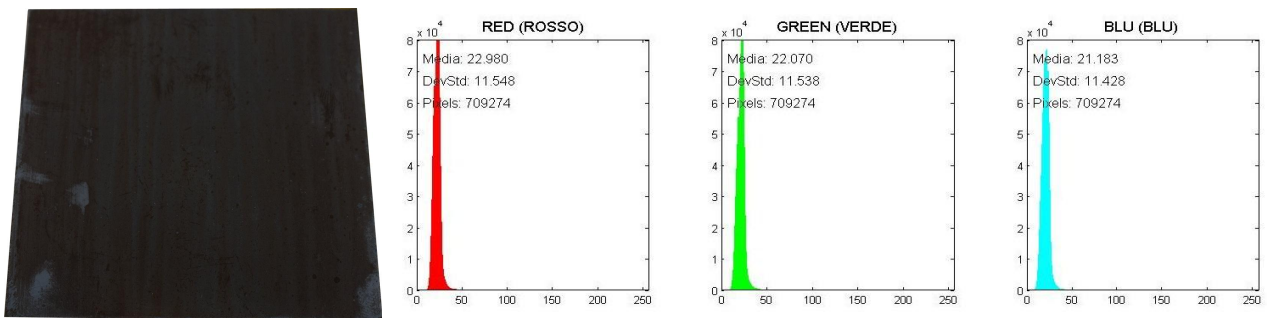


Fig. 4.394 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 1).

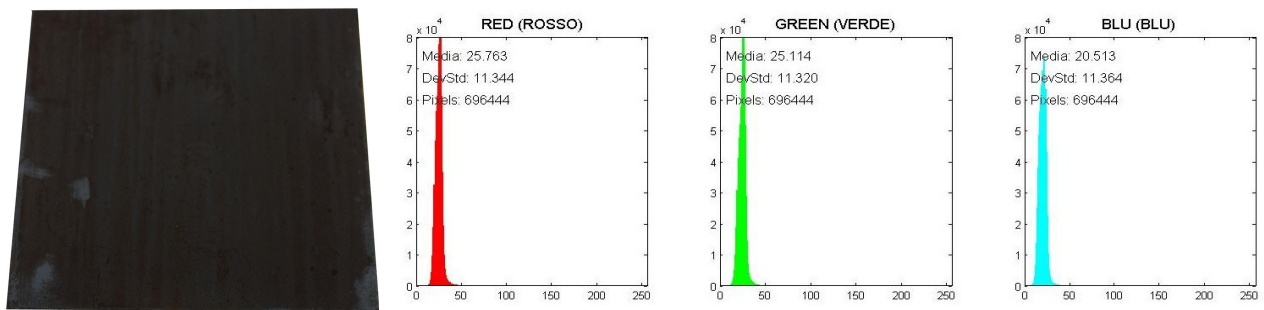


Fig. 4.395 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 2).

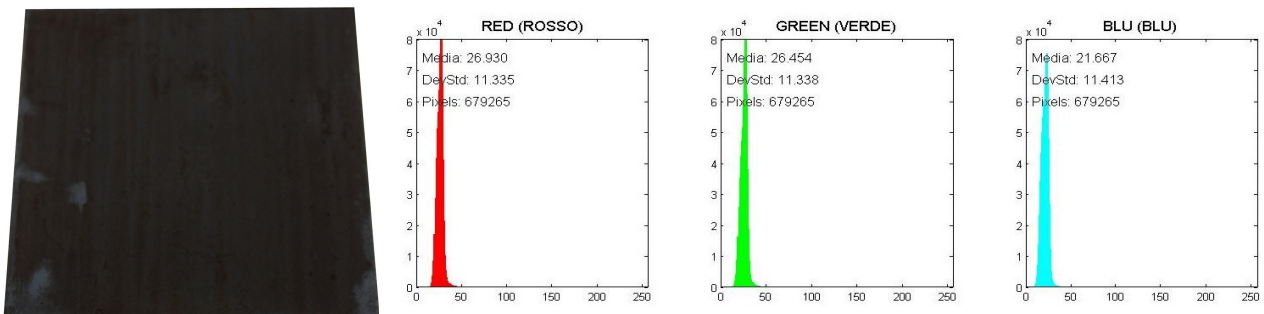


Fig. 4.396 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 3).

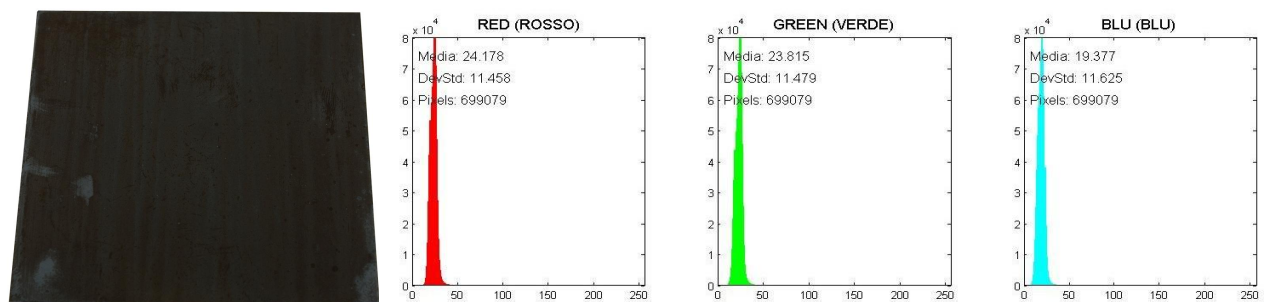


Fig. 4.397 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-1-316-06-B (campione 4).

# C-1050-6-316-06-A:

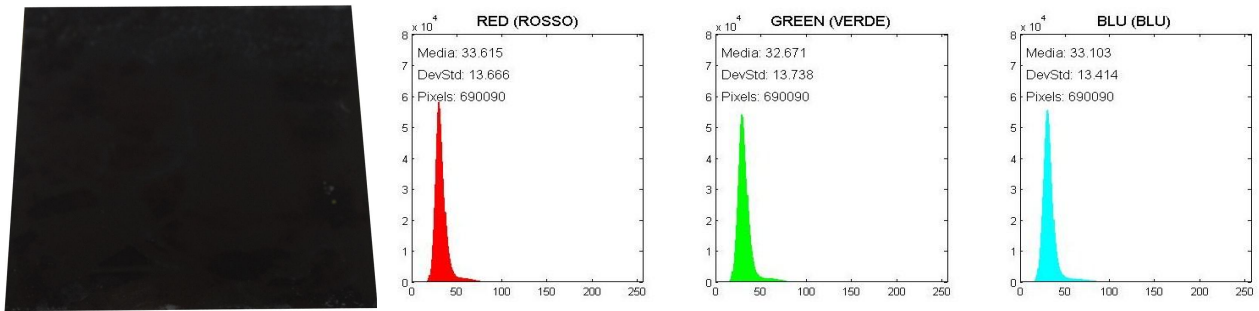


Fig. 4.398 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 1).

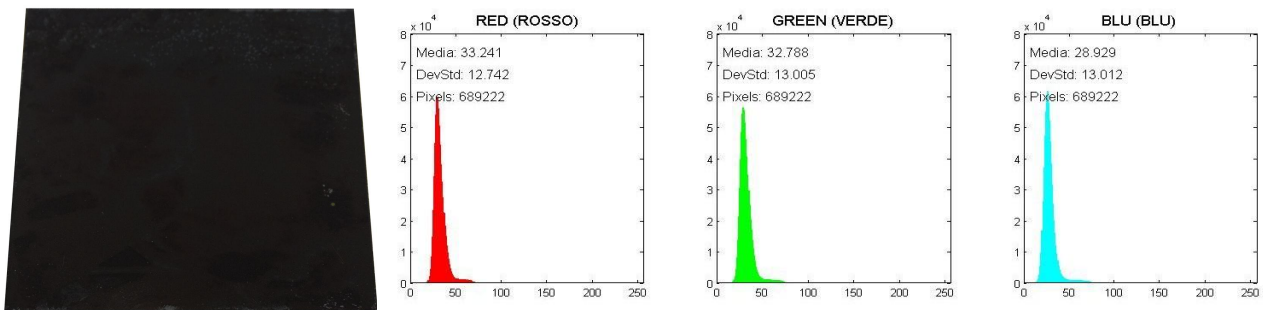


Fig. 4.399 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 2).

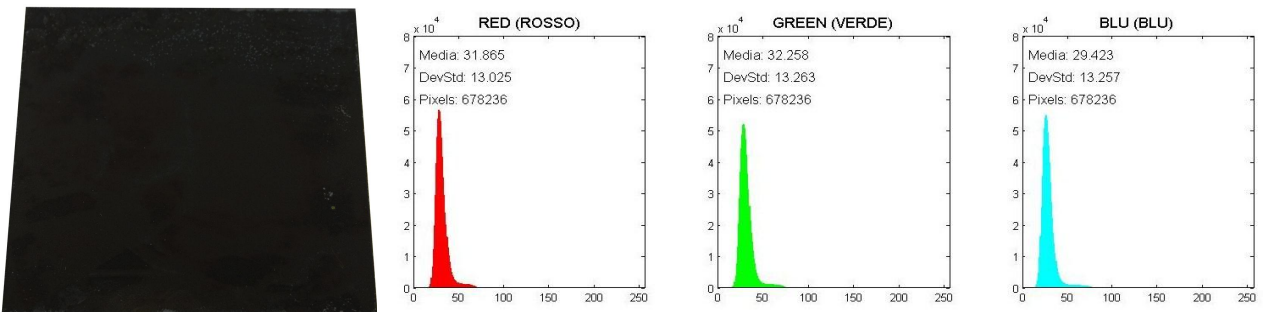


Fig. 4.400 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 3).

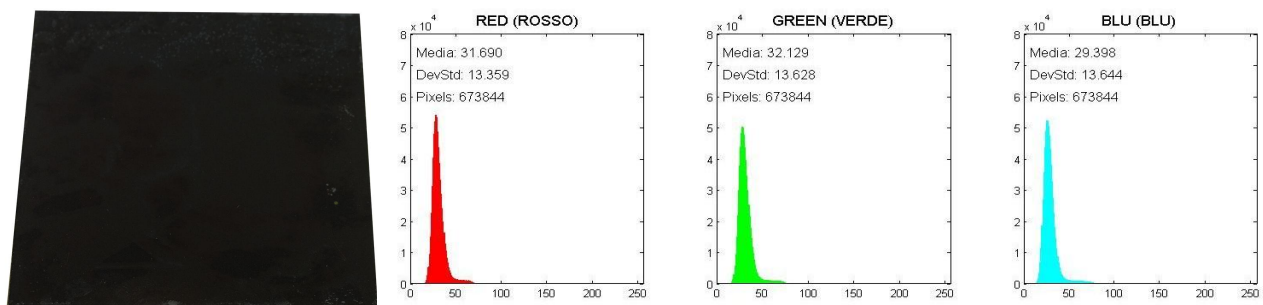


Fig. 4.401 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-A (campione 4).

# C-1050-6-316-06-B:

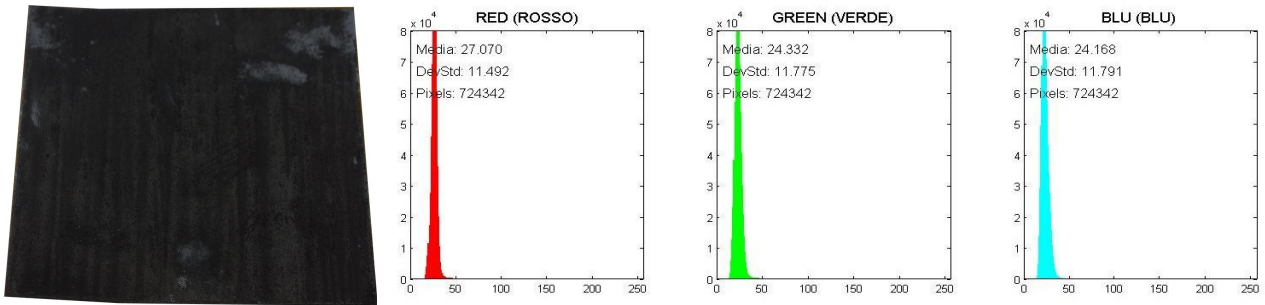


Fig. 4.402 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 1).

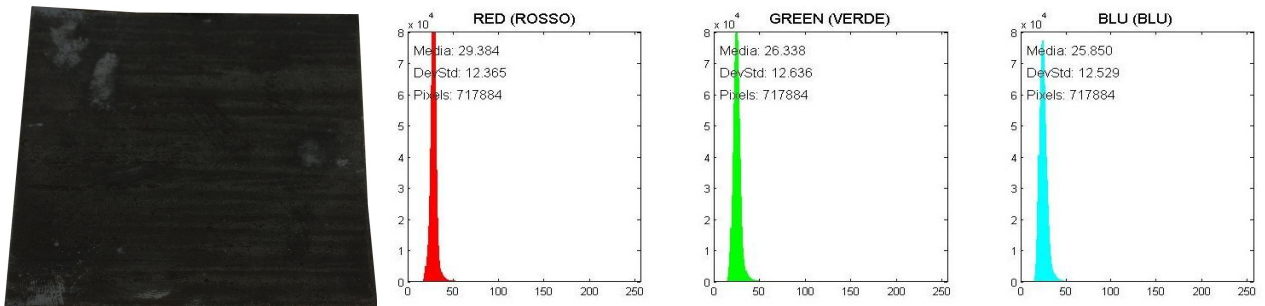


Fig. 4.403 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 2).

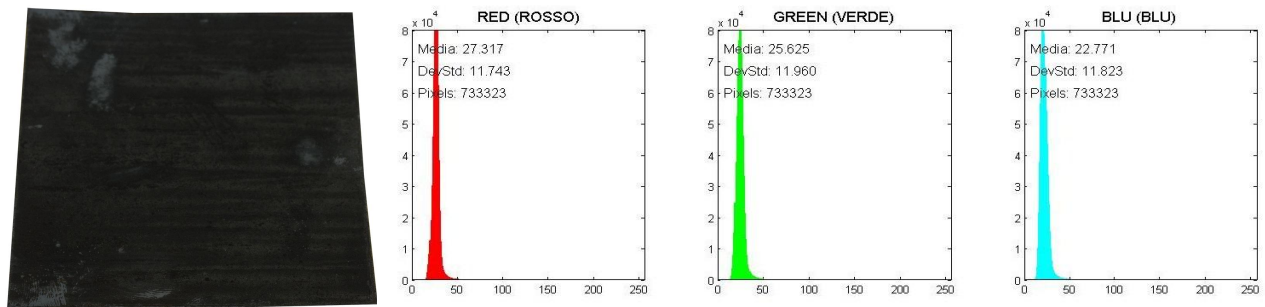


Fig. 4.404 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 3).

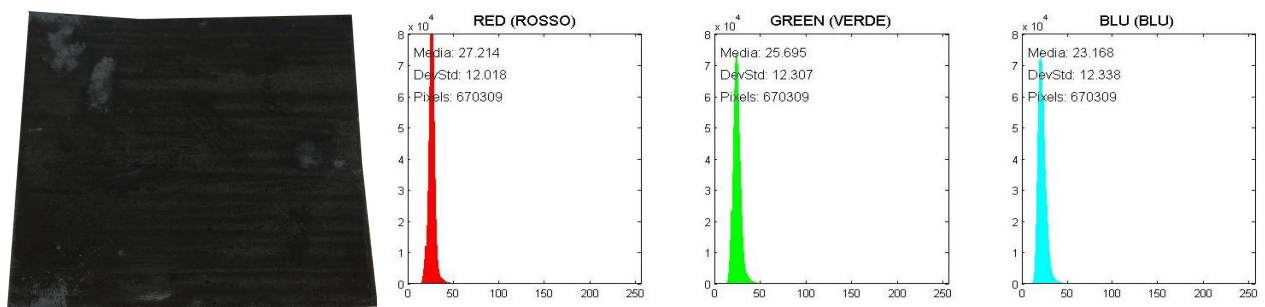


Fig. 4.405 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB C-1050-6-316-06-B (campione 4).

# N-1050-1-316-06-A:

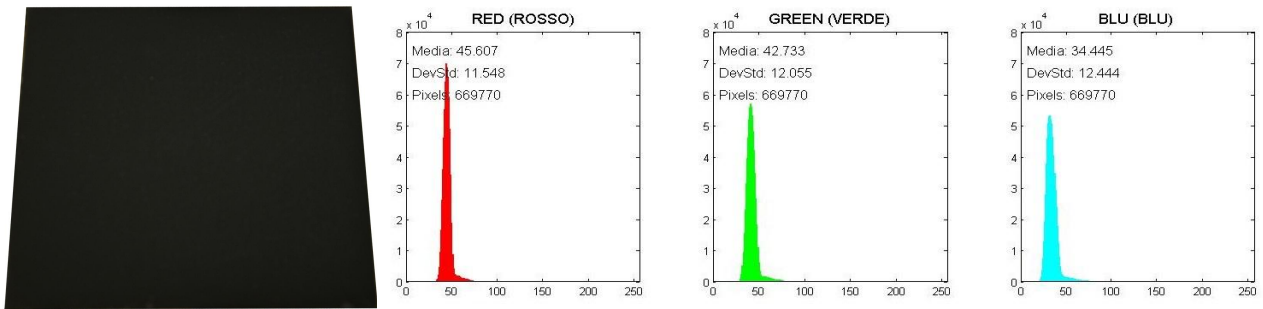


Fig. 4.406 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 1).

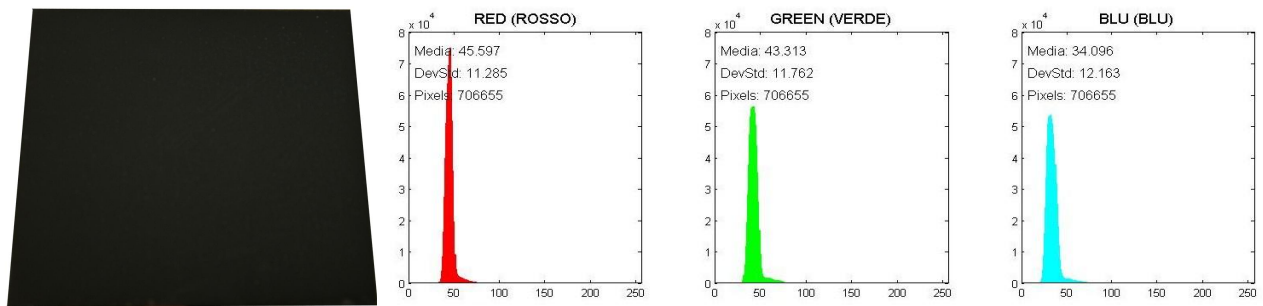


Fig. 4.407 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 2).

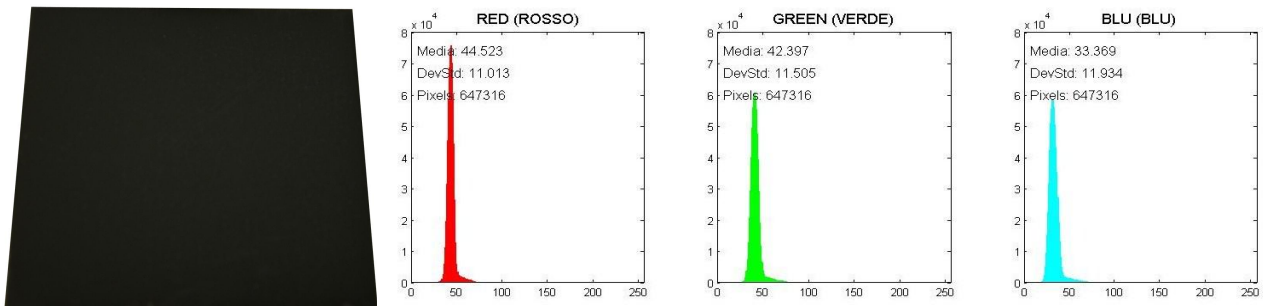


Fig. 4.408 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 3).

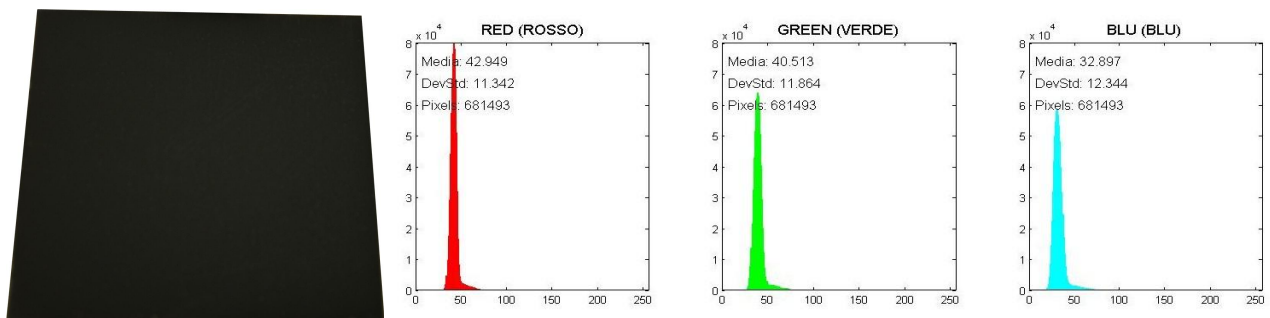


Fig. 4.409 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-A (campione 4).



# N-1050-1-316-06-B:

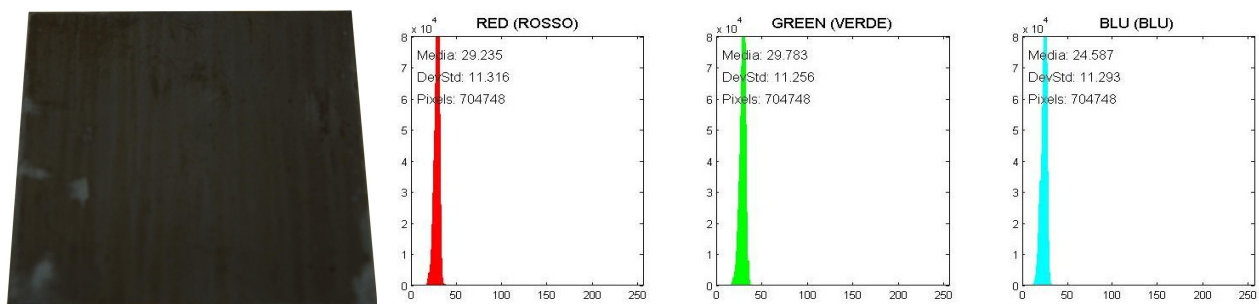


Fig. 4.410 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 1).

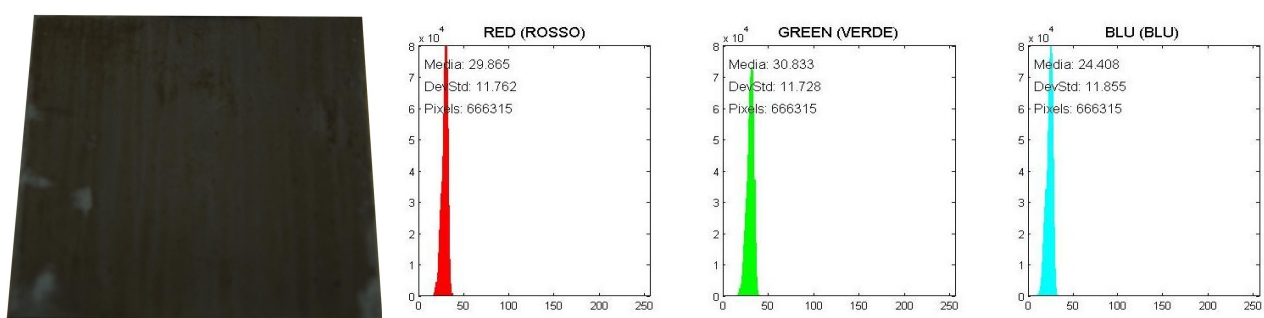


Fig. 4.411 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 2).

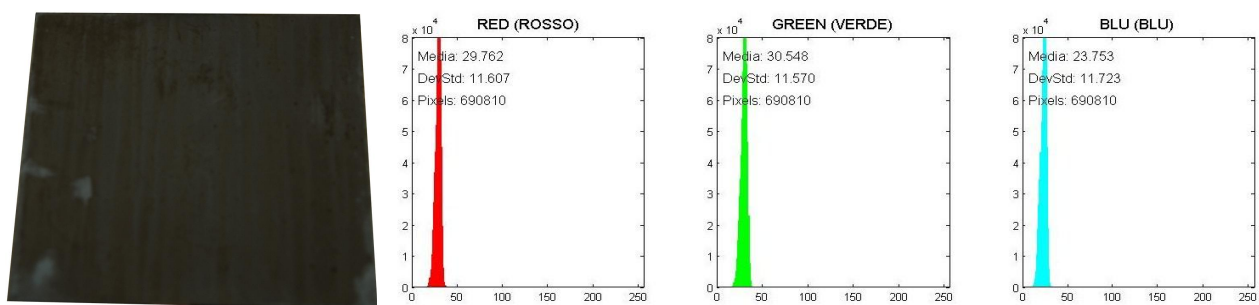


Fig. 4.412 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 3).

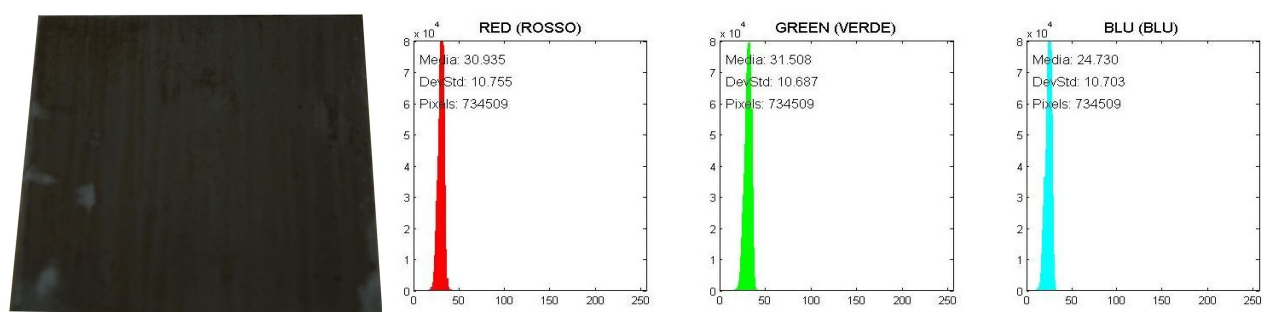


Fig. 4.413 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-1-316-06-B (campione 4).

# N-1050-6-316-06-A:

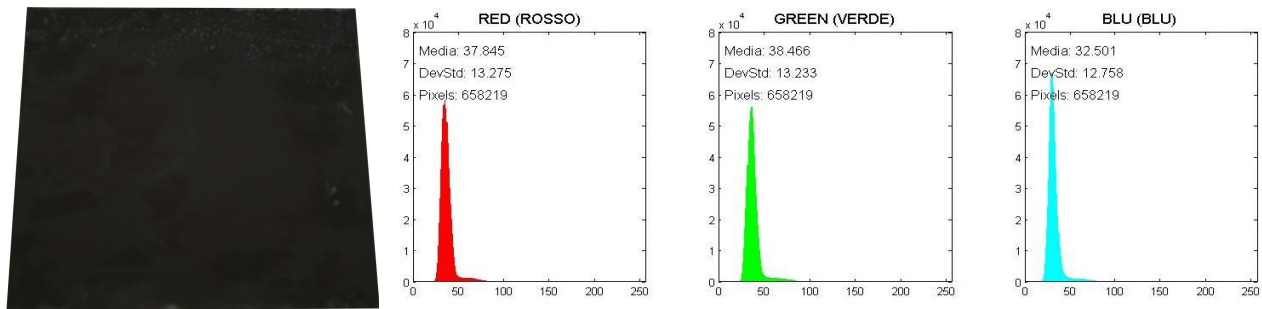


Fig. 4.414 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 1).

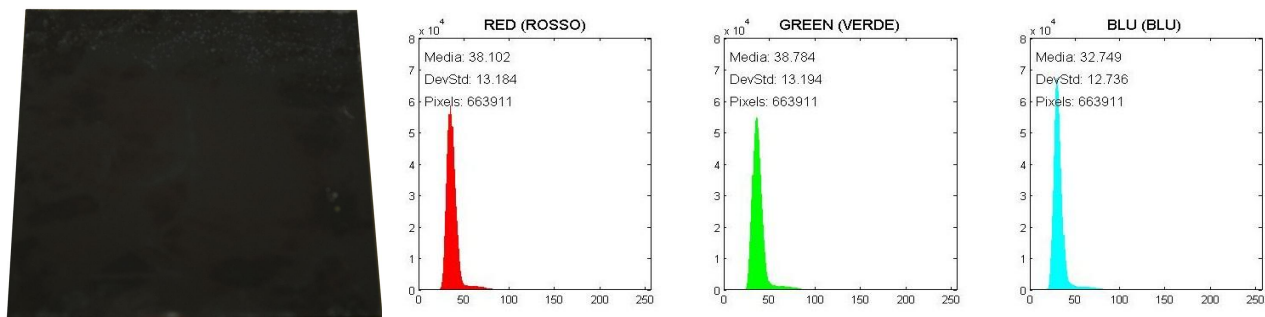


Fig. 4.415 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 2).

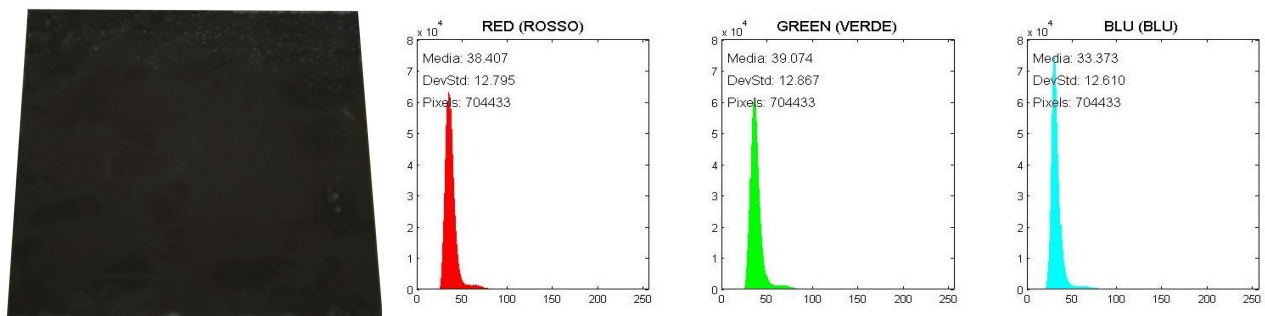


Fig. 4.416 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 3).

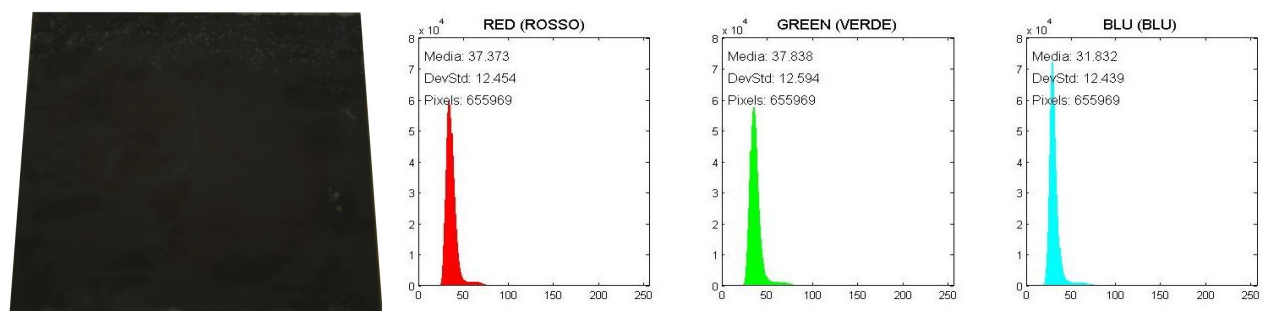


Fig. 4.417 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-A (campione 4).

# N-1050-6-316-06-B:

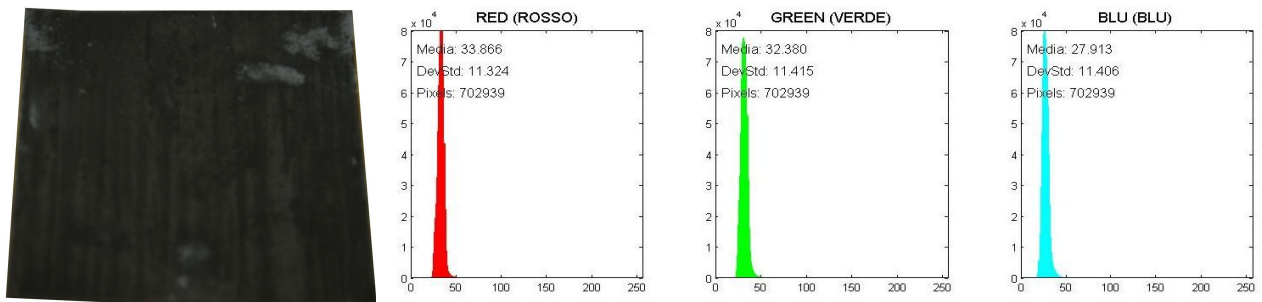


Fig. 4.418 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 1).

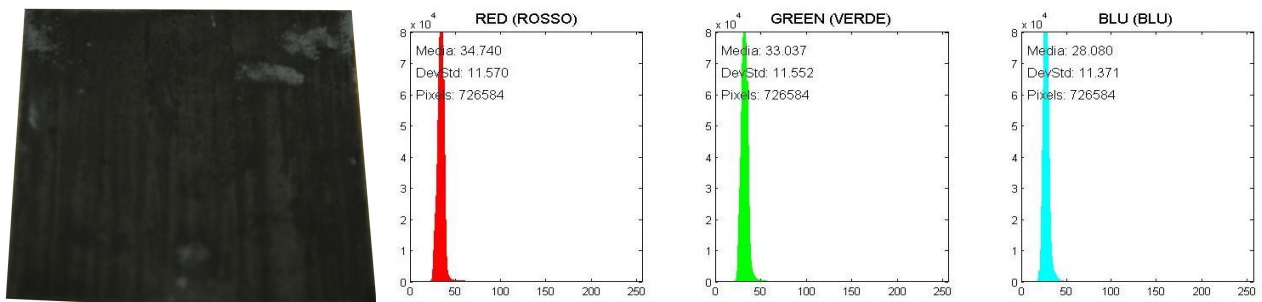


Fig. 4.419 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 2).

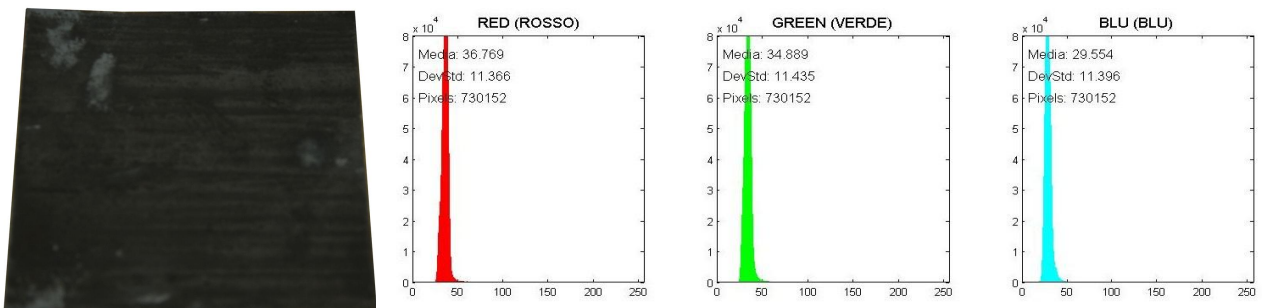


Fig. 4.420 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 3).

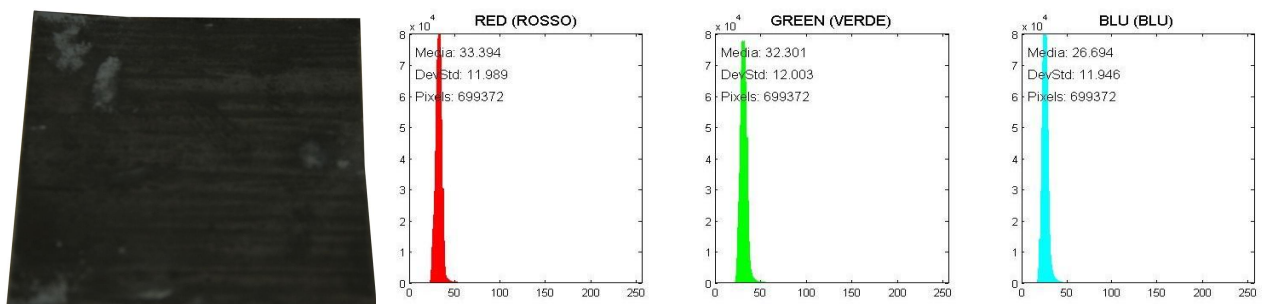


Fig. 4.421 – Immagine della lamiera e istogrammi RGB N-1050-6-316-06-B (campione 4).

#### 4.2.4 – Analisi fotografica: ANOVA

Per ogni canale dei colori RGB viene effettuata un'analisi della varianza per indagare quali livelli combinati dei fattori siano significativamente diversi. L'ANOVA è stata eseguita sia sulle media dell'intensità dei tre canali rosso, verde e blu, che sulla deviazione standard.

Prima di tutto si è svolta l'ANOVA considerando le repliche delle fotografie effettuate; quest'analisi ci permette di individuare due informazioni: la prima ci consente di dire se effettivamente la replica è significativa, ossia se le repliche possono essere fra loro considerate differenti. Nel caso in cui ciò si verificasse, l'analisi successiva, quella che considera i fattori temperatura e tempo, può essere svolta considerando un solo valore per ogni livello. La seconda, invece, è una considerazione sulla bontà e sull'efficacia del light box e di tutto il sistema di taratura sulle macchine fotografiche.

Di seguito viene riportata la procedura adottata per l'analisi delle fotografie sui tre canali rosso, verde e blu.

##### 4.2.4.1 – Analisi della media del canale Rosso

Per prima cosa viene effettuata un'ANOVA rispetto alle repliche delle fotografie. Si riportano i grafici iniziali esplorativi:

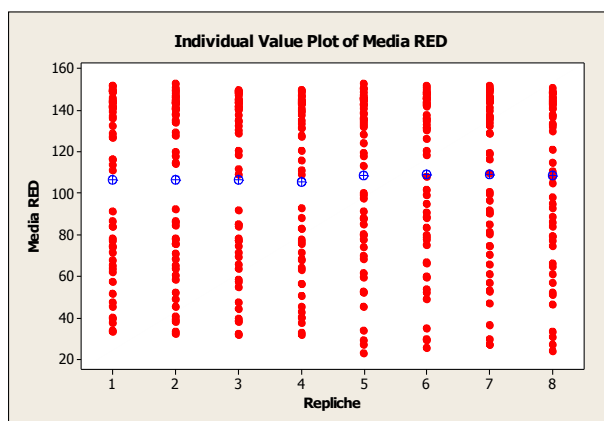


Fig. 4.422 – Grafico dei valori della media del canale rosso rispetto al fattore.

Da una prima analisi qualitativa si può notare come i valori medi delle 8 repliche siano molto simili tra loro. Questo potrebbe farci pensare che le repliche non siano significativamente diverse tra loro, ma che in realtà siano la stessa cosa. Queste considerazioni sono solo qualitative, ma per un'analisi più accurata bisogna effettuare l'ANOVA.

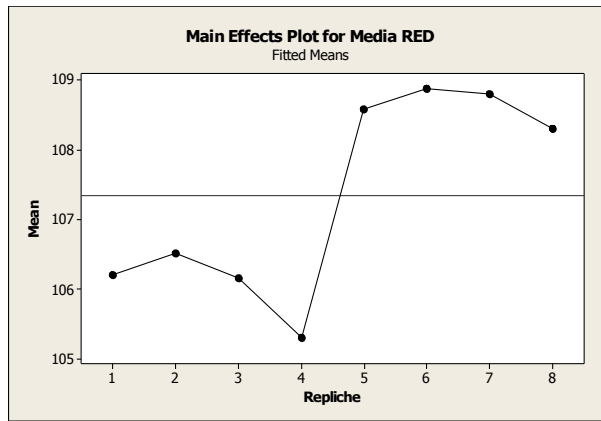


Fig. 4.423 – Grafico dei valori della media rispetto all'effetto principale.

Il grafico degli effetti principali ci conferma quanto descritto sopra: la differenza tra le medie non è molto grande e la scala dell'asse delle ordinate è poco estesa rispetto ai valori.

Di seguito viene riportata la tabella ANOVA:

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F-test	p-value
Repliche	7	755	755	108	0,07	1,000
Errore	408	661816	661816	1622		
Totale	415	662571				
S = 40,2753		R-Sq = 0,11%		R-Sq (adj) = 0,00%		

Tabella 4.5 – Tabella ANOVA della media del canale rosso rispetto alle repliche.

In giallo viene evidenziato il valore del p-value unitario che ci conferma quanto previsto in precedenza, ossia che le repliche non sono significative e il valore  $R^2_{adj}$  che indica che i dati non spiegano assolutamente il modello di previsione. Prima trarre le conclusioni è necessario effettuare la verifica sui residui:

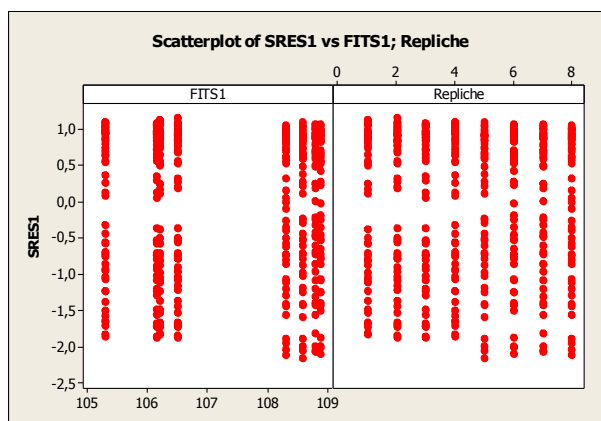


Fig. 4.424 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e al fattore.

Da questo grafico non vengono evidenziati dei residui eccezionali, cioè dei residui il cui valore assoluto supera  $\pm 3$ .

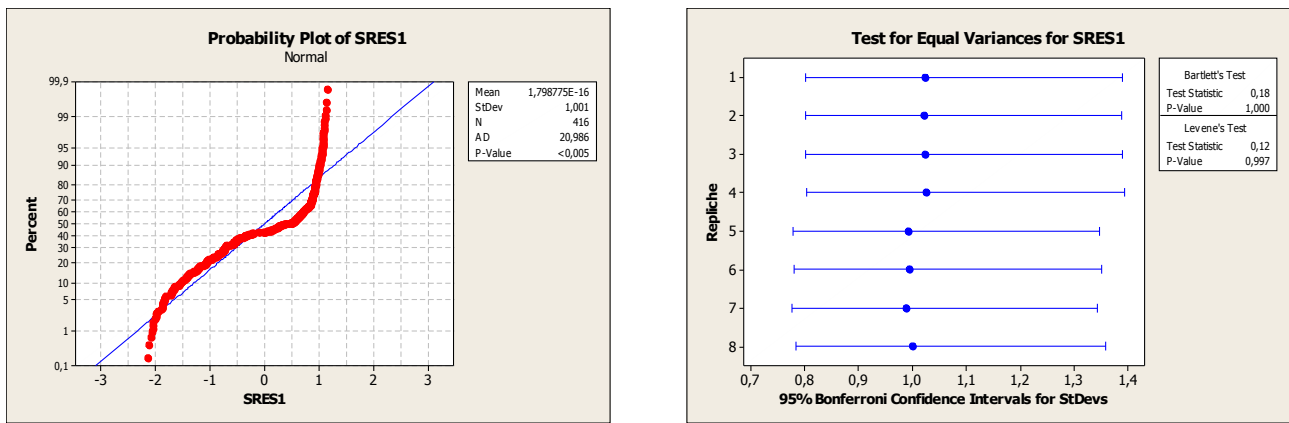


Fig. 4.425 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

Dal grafico di probabilità normale si nota che la verifica sulla normalità dei residui non risulta superata: ciò potrebbe essere dovuto al fatto che molti dati sono spostati troppo rispetto alla campana di una gaussiana.

Il grafico in fig. 425 b) mostra l'omogeneità in varianza dei residui: il test di Levene mostra come i residui siano da considerarsi omogenei in varianza.

In conclusione possiamo affermare che le repliche non sono significative e che quindi scegliere uno dei quattro valori o la media, la mediana, ecc. non fa alcuna differenza nell'analisi successiva. Per comodità scegliamo di utilizzare la media delle quattro repliche. Questa scelta ci permette di alleggerire molto l'analisi seguente (passando da 416 dati a poco più di cento!) nonché di concentrare l'analisi in ciò che maggiormente ci interessa, ossia il confronto a coppie tra i livelli dei fattori.

Di seguito viene svolta un'analisi con una sola replica per ogni condizione sperimentale.

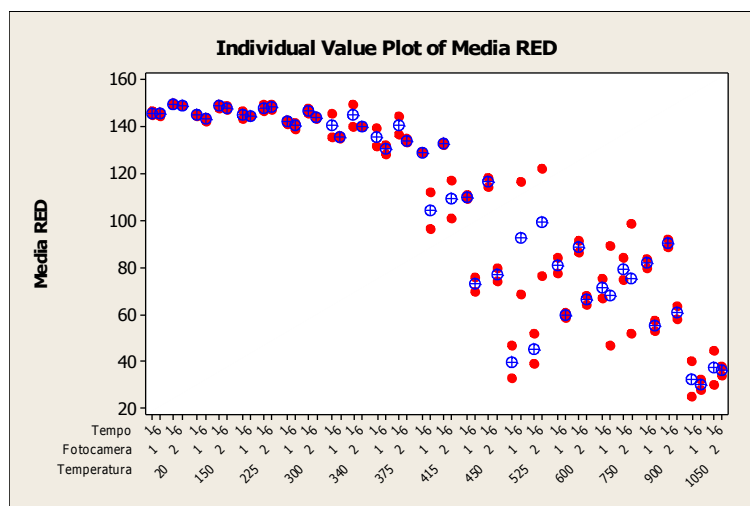


Fig. 4.426 – Grafico dei valori della media del canale rosso rispetto ai fattori.

Da questo primo grafico esplorativo si può vedere come l'influenza della temperatura sia molto marcata, mentre risulta più difficile capire l'effettiva influenza degli altri due fattori:

soprattutto alle basse temperature (fino a 300 gradi) non sembrano esserci grosse differenze tra i livelli dei tre fattori, cosa che non si può assolutamente affermare per le temperature superiori.

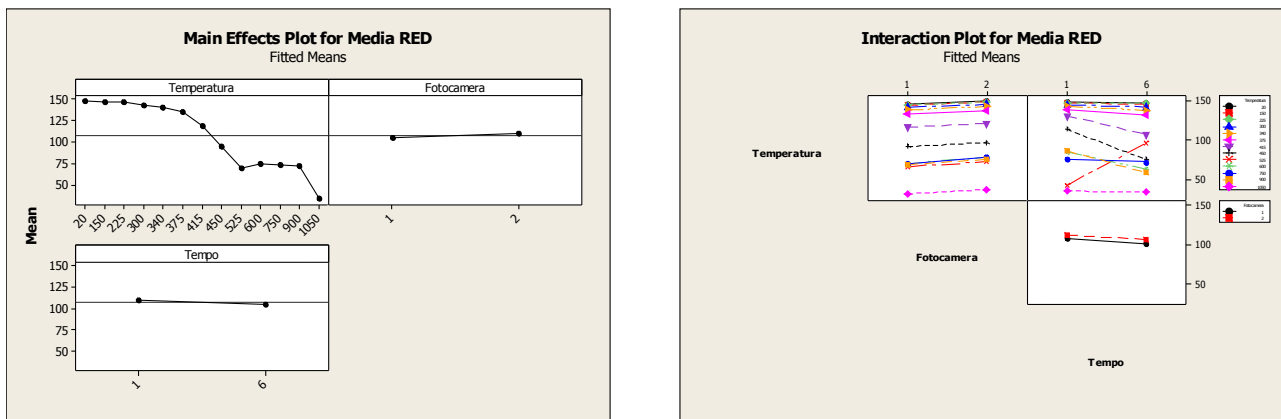


Fig. 4.427 – Grafico dei valori della media rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b).

Come anticipato l'influenza della temperatura è molto maggiore rispetto a quella degli altri fattori, ma queste sono solo conclusioni qualitative che verranno confermate o meno dell'ANOVA. Dal grafico delle interazioni (fig. 4.427 b)) si può notare come non sembra essere significativa l'interazione della fotocamera con gli altri due fattori, mentre l'interazione temperatura\*tempo debba essere più dettagliatamente indagata.

Di seguito viene riportata la tabella ANOVA:

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F - test	p-value
Temperatura	12	146313,6	146313,6	12192,8	121,31	0,000
Fotocamera	1	683,6	683,6	683,6	6,80	0,012
Tempo	1	968,1	968,1	968,1	9,63	0,003
Temperatura*fotocamera	12	48,8	48,8	4,1	0,04	1,000
Temperatura*Tempo	12	11443,4	11443,4	953,6	9,49	0,000
Fotocamera*Tempo	1	0,9	0,9	0,9	0,01	0,925
Temperatura*Tempo*Fotocamera	12	11,9	11,9	1,0	0,01	1,000
Errore	52	5226,4	5226,4	100,5		
Totale	103	164696,7				
S = 10,0253		R-Sq = 96,83%		R-Sq (adj) = 93,71%		

Tabella 4.6 – Tabella ANOVA della media del canale rosso rispetto a temperatura, tempo e fotocamera.

Dalla tabella ANOVA si può concludere che i fattori significativi sono la temperatura, il tempo e la loro interazione (evidenziati in giallo!). Il fattore fotocamera non risulta significativo in quanto è stato scelto di usare un approccio più conservativo considerando come probabilità di errore di prima specie non più il 5%, ma quest'ultimo diviso il numero di fattori. Da segnalare anche sono presenti dei residui standard con valore in modulo maggiore di 3: questo sicuramente darà dei problemi sulle verifiche di normalità e di omogeneità in varianza degli

stessi.

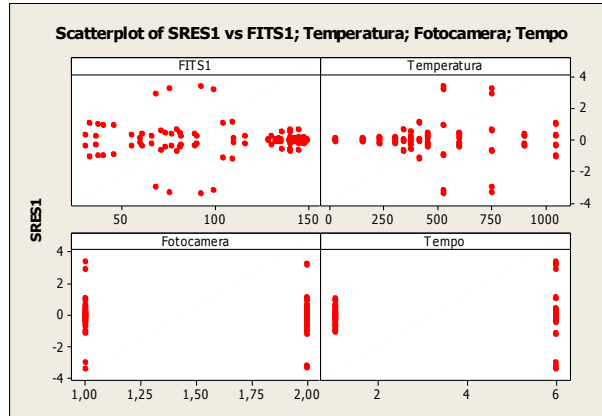


Fig. 4.428 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori.

Da questo grafico si notano i residui eccezionali con valori in modulo maggiore di 3, ma non ci sono andamenti anomali. Inoltre, si può intuire la disomogeneità della dispersione dei residui rispetto al fattore tempo.

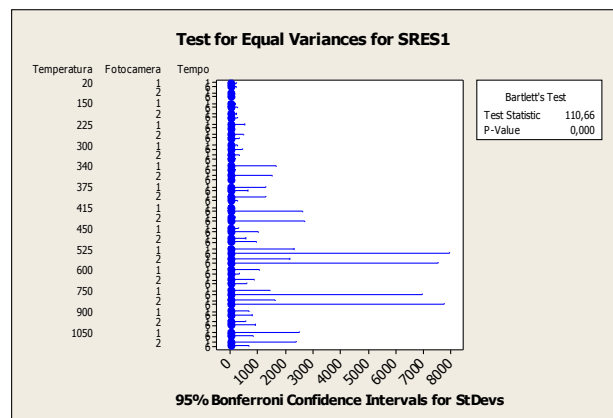
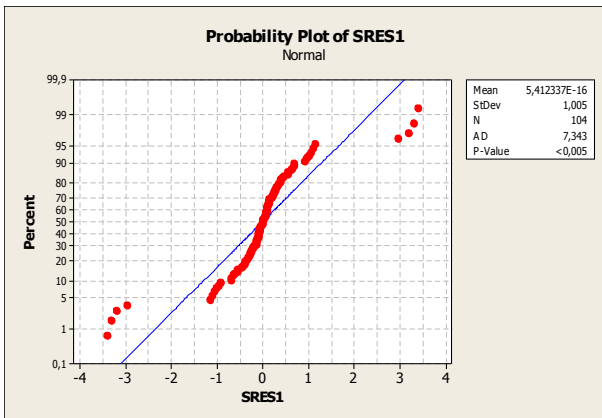


Fig. 4.429 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

Come precedentemente anticipato le verifiche di normalità dei residui e quella relativa all'omogeneità in varianza risultano entrambe non superate.

Il modello da sviluppare è un modello completo a due fattori, temperatura e tempo, in cui viene considerata anche l'interazione temperatura-tempo.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva dei confronti a coppie tra i livelli effettuati con il test di Tukey: dove compare la x, vuol dire che i due livelli sono significativamente differenti:

	20 - 1	20 - 6	150 - 1	150 - 6	225 - 1	225 - 6	300 - 1	300 - 6	340 - 1	340 - 6	375 - 1	375 - 6	415 - 1	415 - 6	450 - 1	450 - 6	525 - 1	525 - 6	600 - 1	600 - 6	750 - 1	750 - 6	900 - 1	900 - 6	1050 - 1	1050 - 6
20 - 1														X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
20 - 6														X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
150 - 1														X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
150 - 6														X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X





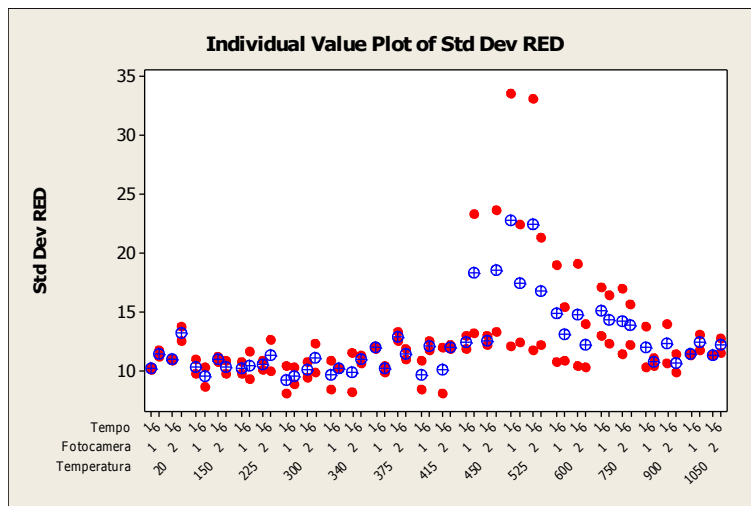


Fig. 4.430 – Grafico dei valori della deviazione standard del canale rosso rispetto ai fattori.

Si può notare come i valori di deviazione standard nell'intervallo di temperatura che va dai 450 – 600°C siano molto più elevati: ciò indica una forte disomogeneità della colorazione superficiale.

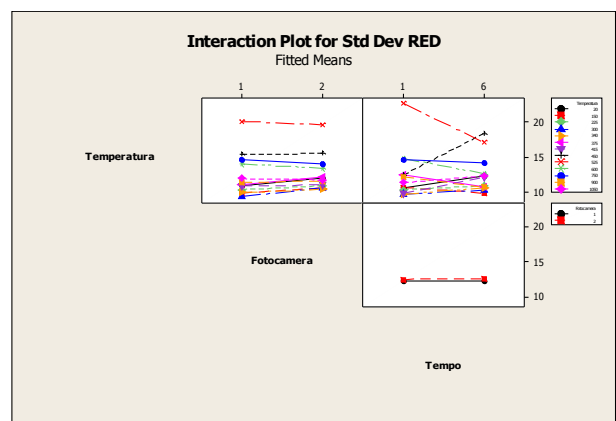
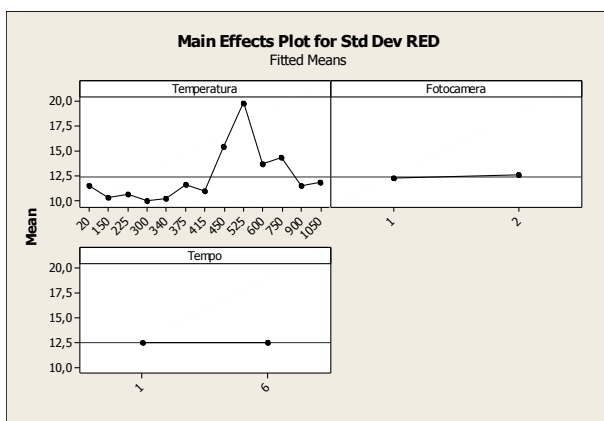


Fig. 4.431 – Grafico dei valori della deviazione standard rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b).

Anche dall'analisi di questi grafici si può intuire come il fattore temperatura sia preponderante rispetto agli altri due (figura 4.431 a)). L'interazione tra temperatura e tempo sembra poter essere interessante, mentre le altre hanno meno importanza.

Di seguito viene riportata la tabella ANOVA:

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F - test	p-value
Temperatura	12	749,38	749,38	62,45	3,89	0,000
Fotocamera	1	2,30	2,30	2,30	0,14	0,707
Tempo	1	0,10	0,10	0,10	0,01	0,937
Temperatura*fotocamera	12	10,17	10,17	0,85	0,05	1,000
Temperatura*Tempo	12	172,69	172,69	14,39	0,90	0,556
Fotocamera*Tempo	1	0,07	0,07	0,07	0,00	0,948
Temperatura*Tempo*Fotocamera	12	1,74	1,74	0,15	0,01	1,000
Errore	52	834,38	834,38	16,05		

Totale	103	1770,83			
S = 4,00571		R-Sq = 52,88%	<b>R-Sq (adj) = 6,67%</b>		

Tabella 4.8 – Tabella ANOVA della deviazione standard del canale rosso rispetto a temperatura, tempo e fotocamera.

Dalla tavola ANOVA si possono ricavare due informazioni: la prima indica che l'unico fattore significativo risulta essere la temperatura (evidenziata in giallo), mentre la seconda suggerisce che i dati non spiegano assolutamente il modello (come evidenziato dal valore  $R^2_{adj}$ ).

Di seguito vengono riportate le verifiche sui residui:

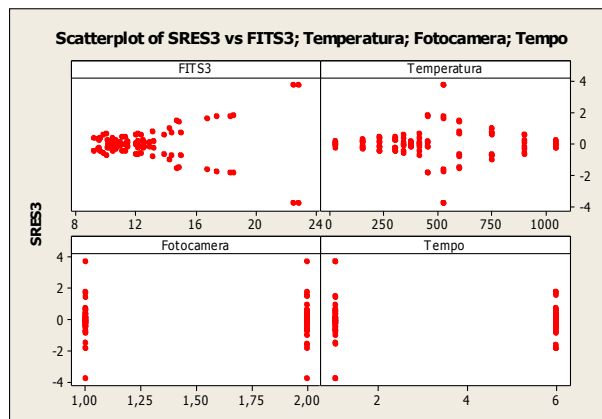


Fig. 4.432 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori.

Dai grafici si riescono ad individuare i residui con valori eccezionali e dal grafico fatto rispetto alle osservazioni si può intravedere un andamento crescente dei residui. Probabilmente questo potrà causare dei problemi alle verifiche di normalità e omogeneità in varianza.

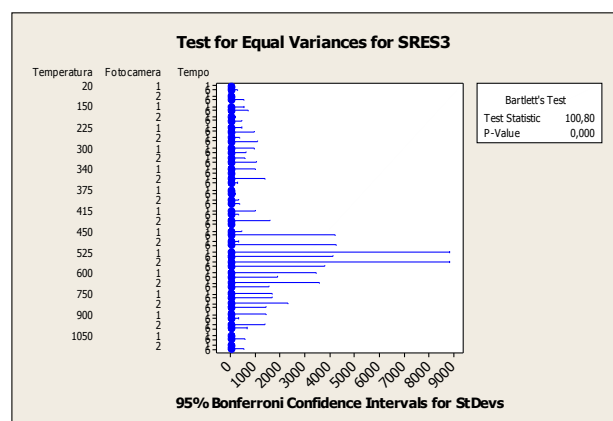
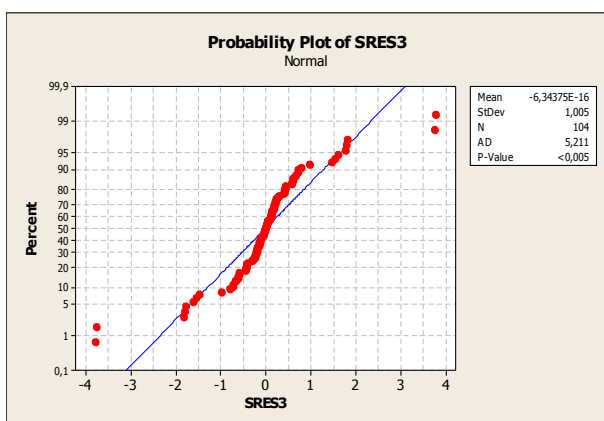


Fig. 4.433 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

Come si può vedere dal grafico in fig. 4.433 b), a causa dei residui nell'intervallo di temperatura da 450 – 600°C, le due verifiche risultano non superate. Questi residui hanno un valore molto maggiore rispetto alla media degli altri valori.

#### 4.2.4.3 – Analisi della media del canale verde

Analogamente per quanto fatto con il canale rosso andiamo ad indagare l'influenza delle repliche sulla media in modo da riuscire ad alleggerire l'analisi successiva e, allo stesso tempo, valutare la bontà dell'apparato sperimentale.

Si riportano i grafici esplorativi per il canale del verde.

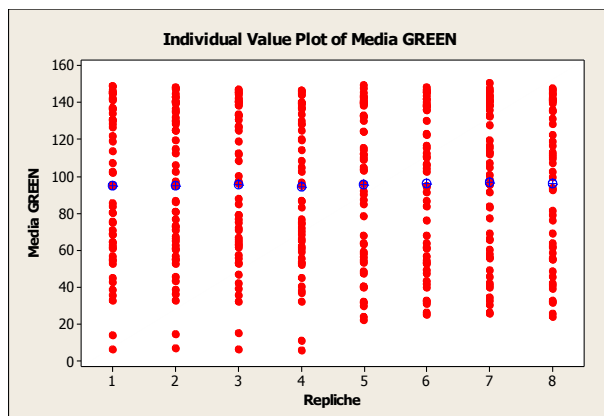


Fig. 4.434 – Grafico dei valori della media del canale verde rispetto al fattore.

Come si può notare, anche in questo caso le repliche risultano avere valori molto simili di media.

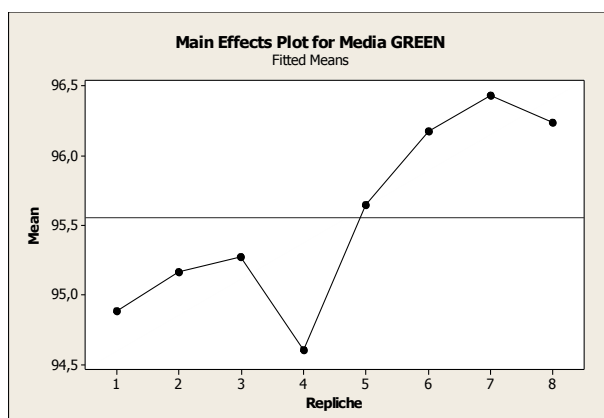


Fig. 4.435 – Grafico dei valori della media rispetto all'effetto principale.

La scala dell'asse delle ordinate ci indica che la distribuzione rimane in un intervallo piuttosto stretto di valori.

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F-test	p-value
Repliche	7	167	167	24	0,01	1,000
Errore	408	678994	678994	1664		
Totale	415	679162				
S = 40,7946		R-Sq = 0,02%		R-Sq (adj) = 0,00%		

Tabella 4.9 – Tabella ANOVA della media del canale verde rispetto alle repliche.

Anche in questo caso le repliche non sono significative e il modello non è assolutamente spiegato dai dati. Vediamo ora l'analisi dei residui per capire se sono normali e omogenei in varianza.

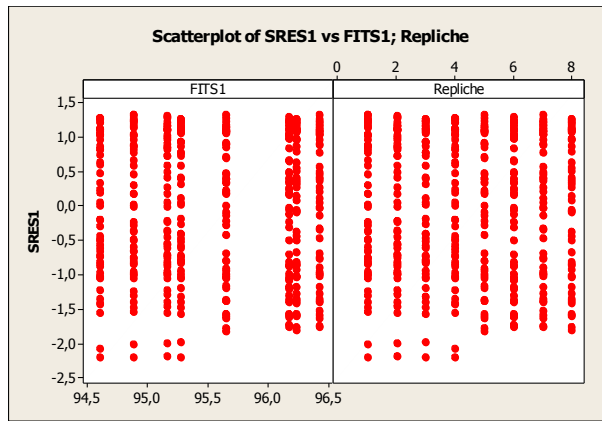


Fig. 4.436 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori.

Dal grafico si può evidenziare che non sono presenti residui con valori eccezionali.

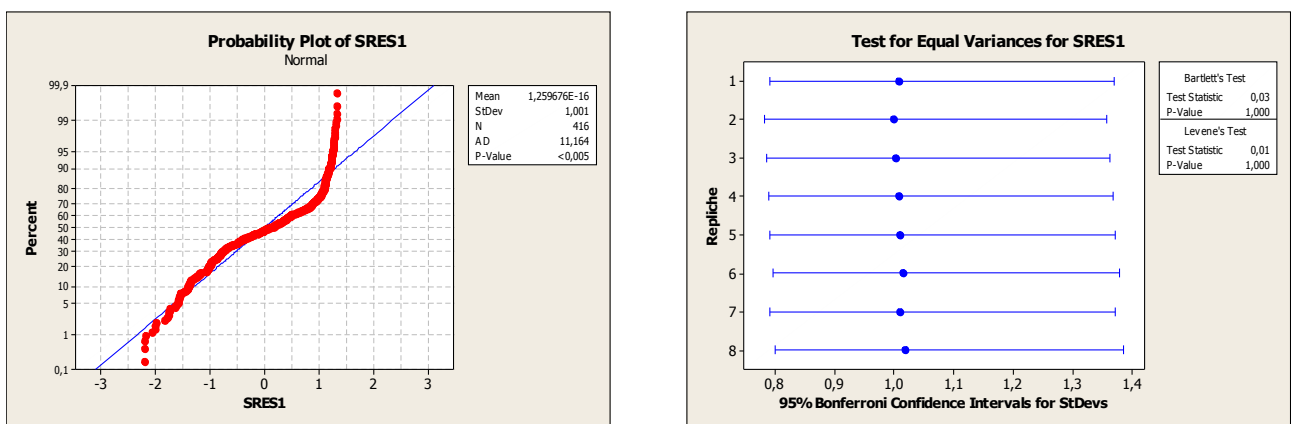


Fig. 4.437 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

I residui non sono normali e hanno praticamente la stessa varianza. Gli stessi risultati che si sono ottenuti con il canale del rosso ritornano anche con il canale verde. Di seguito si svolge l'analisi con una sola replica.

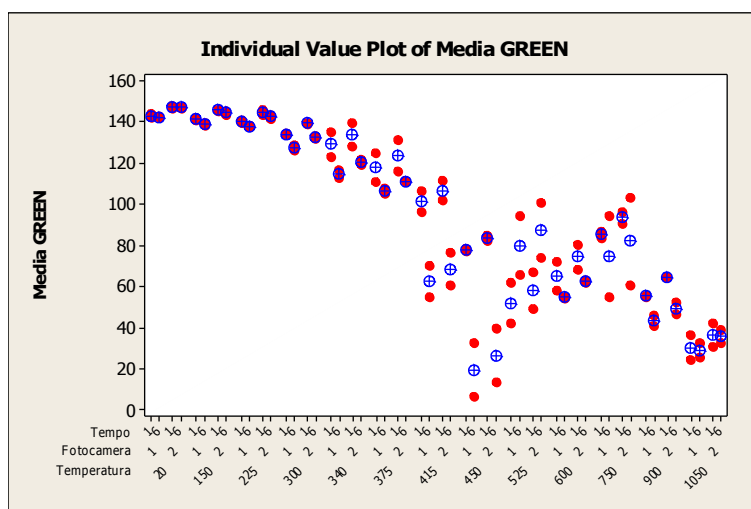


Fig. 4.438 – Grafico dei valori della media del canale verde rispetto ai fattori.

Dal grafico si può notare come la temperatura influenzi la media maggiormente rispetto agli altri due fattori, ma queste sono solo ipotesi preliminari che andranno verificate dall'ANOVA.

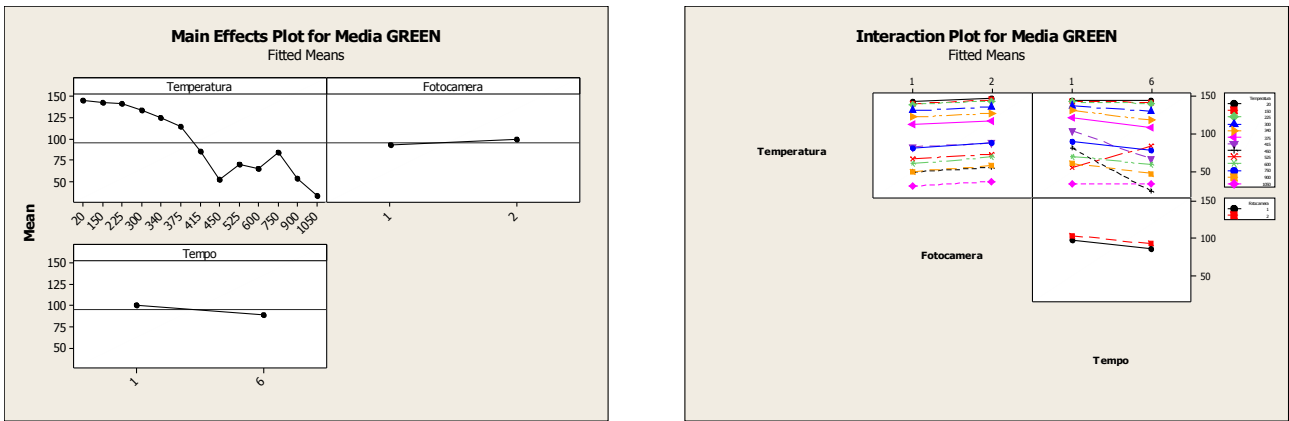


Fig. 4.439 – Grafico dei valori della deviazione standard rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b).

Il grafico degli effetti principali conferma che la temperatura influenza la media più del tempo e della fotocamera. Per quanto riguarda le interazioni sembra essere significativa solo l'interazione temperatura\*tempo.

Di seguito si riporta la tabella ANOVA:

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F - test	p-value
Temperatura	12	150685,6	150685,6	12557,1	141,92	0,000
Fotocamera	1	945,8	945,8	945,8	10,69	0,002
Tempo	1	3057,4	3057,4	3057,4	34,55	0,000
Temperatura*fotocamera	12	42,5	42,5	3,5	0,04	1,000
Temperatura*Tempo	12	9766,6	9766,6	813,9	9,20	0,000
Fotocamera*Tempo	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,998
Temperatura*Tempo*Fotocamera	12	11,9	11,9	1,0	0,01	1,000
Errore	52	4601,1	4601,1	88,5		
Totale	103	169110,0				
S = 9,40648		R-Sq = 97,28%		R-Sq (adj) = 94,61%		

Tabella 4.10 – Tabella ANOVA della media del canale verde rispetto a temperatura, tempo e fotocamera.

I risultati dell'ANOVA suggeriscono che il modello è un modello completo in temperatura e tempo con in più il fattore fotocamera. Di seguito si riportano le verifiche sui residui:

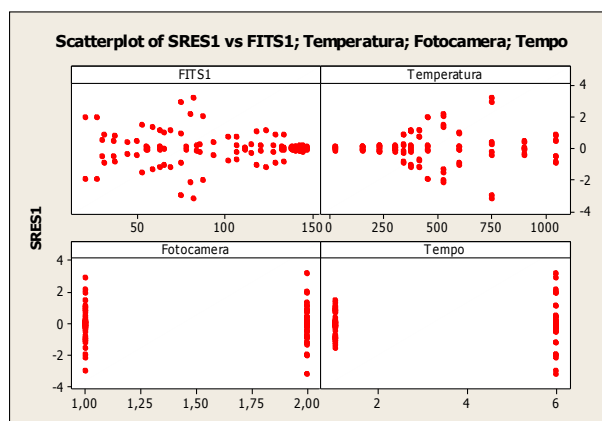


Fig. 4.440 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori.

I residui risultano avere una dispersione normale senza seguire trend. I residui del livello alto del tempo risultano avere una dispersione più elevata.

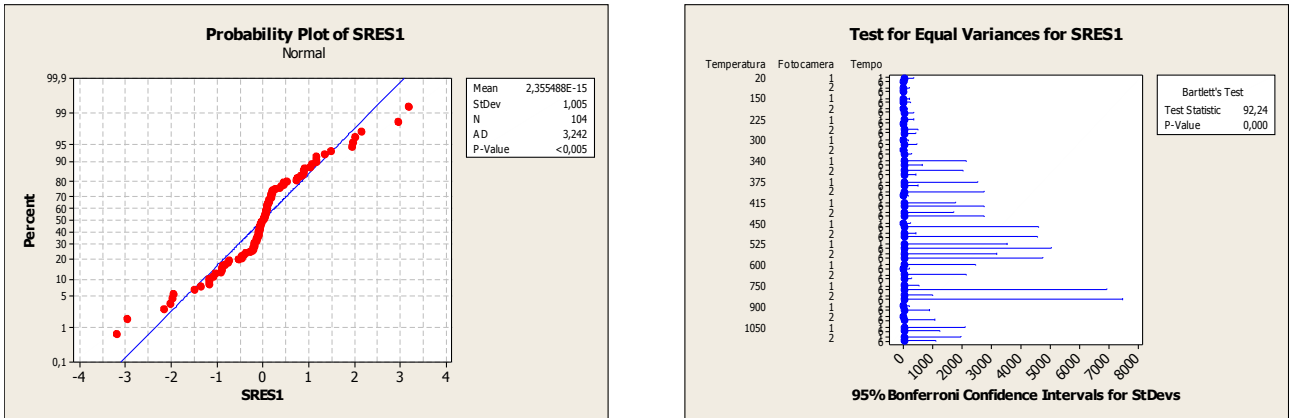


Fig. 4.441 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

Entrambe le verifiche non risultano superate: dal grafico b) si può notare i residui alla temperatura di 750°C abbiano una varianza molto maggiore rispetto agli altri.

Di seguito viene riportato un grafico riassuntivo del test di Tukey dove con la x viene indicato il livello significativamente diverso:

	20 - 1	20 - 6	150 - 1	150 - 6	225 - 1	225 - 6	300 - 1	300 - 6	340 - 1	340 - 6	375 - 1	375 - 6	415 - 1	415 - 6	450 - 1	450 - 6	525 - 1	525 - 6	600 - 1	600 - 6	750 - 1	750 - 6	900 - 1	900 - 6	1050 - 1	1050 - 6	
20 - 1										X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
20 - 6									X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
150 - 1											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
150 - 6											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
225 - 1											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
225 - 6											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
300 - 1											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
300 - 6													X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
340 - 1														X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
340 - 6	X	X											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
375 - 1														X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
375 - 6	X	X	X	X	X	X	X						X	X	X	X			X	X		X	X	X	X	X	X
415 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X						X		X	X		X	X				X	X	X	X
415 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X											X	X
450 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X									X	X	X
450 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
525 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X		X			X						
525 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X								X	X	X
600 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X									X	X	X
600 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X					X						X
750 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X			X				X	X	X	X
750 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X								X	X	X	X
900 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X					X				X	X	X
900 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								X	X						
1050 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X			X	X			

1050 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X						
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--

Tabella 4.11 – Tabella riassuntiva del test di Tukey del canale verde.

Come si può vedere dal test di Tukey fino alla temperatura di circa 375°C non viene rilevato un sensibile cambiamento dell'intensità del canale del colore verde. Dopo questa temperatura inizia a complicarsi la situazione.

#### 4.2.4.4 – Analisi della deviazione standard del canale verde

L'analisi viene svolta in modo del tutto analogo a quanto effettuato per il canale del rosso:

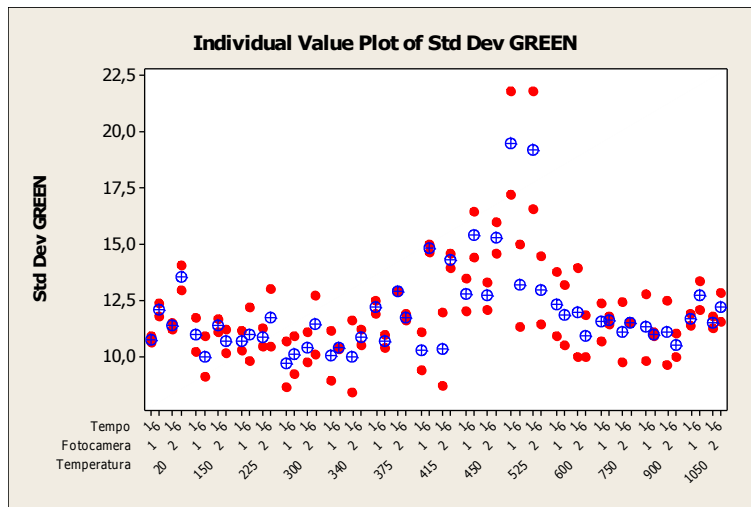


Fig. 4.442 – Grafico dei valori della deviazione standard del canale verde rispetto ai fattori.

Dal grafico si riesce a notare come la deviazione standard nell'intervallo di temperatura tra i 450 – 525°C sia molto differente dagli altri valori.

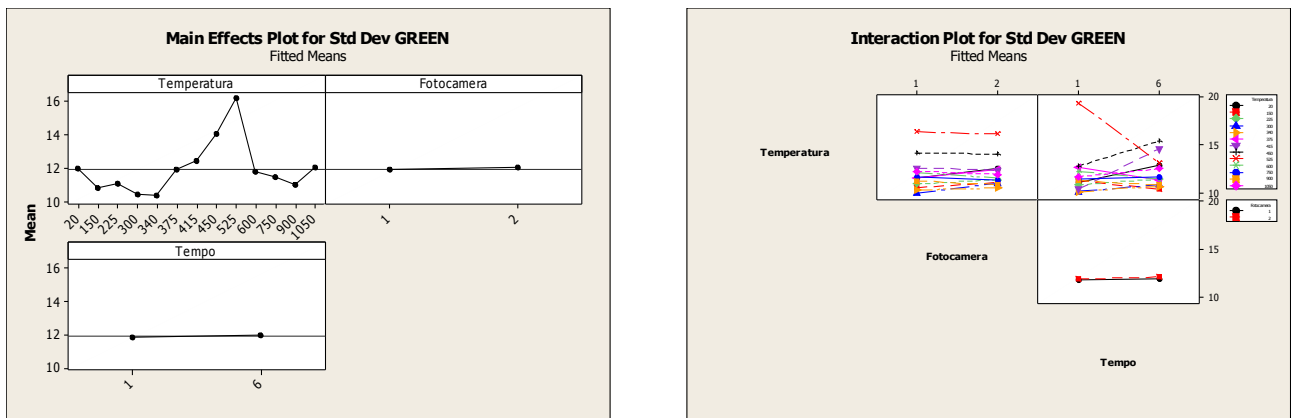


Fig. 4.443 – Grafico dei valori della deviazione standard rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b).

Da questi grafici esplorativi si intuisce che la temperatura influenza in modo maggiore la deviazione standard rispetto agli altri fattori. L'interazione tra i fattori deve essere indagata con maggiore attenzione tenendo conto delle intersezioni sul grafico.

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F - test	p-value
---------	------------------	----	--------	--------	----------	---------



Temperatura	12	247,984	247,984	20,665	10,02	0,000
Fotocamera	1	0,569	0,569	0,569	0,28	0,602
Tempo	1	0,548	0,548	0,548	0,27	0,609
Temperatura*fotocamera	12	7,963	7,963	0,664	0,32	0,982
Temperatura*Tempo	12	143,661	143,661	11,972	5,81	0,000
Fotocamera*Tempo	1	0,115	0,115	0,115	0,06	0,815
Temperatura*Tempo*Fotocamera	12	1,333	1,333	0,111	0,05	1,000
Errore	52	107,228	107,228	2,062		
Totale	103	509,40				
S = 1,43600		R-Sq = 78,95%		R-Sq (adj) = 58,30%		

Tabella 4.12 – Tabella ANOVA della deviazione standard del canale verde rispetto a temperatura, tempo e fotocamera.

Anche in questo caso l'ANOVA ci dice che il solo fattore significativo è la temperatura e il modello non risulta essere spiegato adeguatamente dai dati.

Di seguito si riportano le verifiche sui residui:

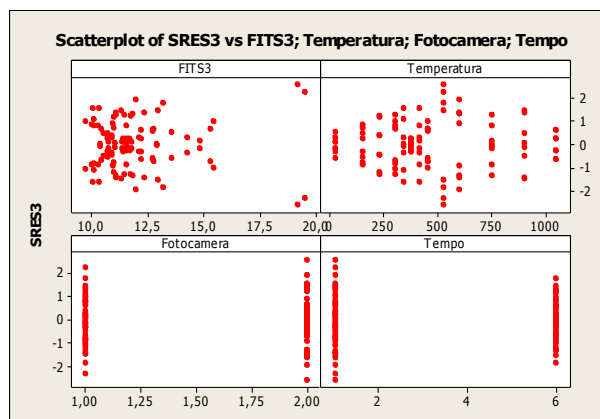


Fig. 4.444 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori.

Non vengono segnalati residui con valori eccezionali e la dispersione sembra essere più o meno omogenea.

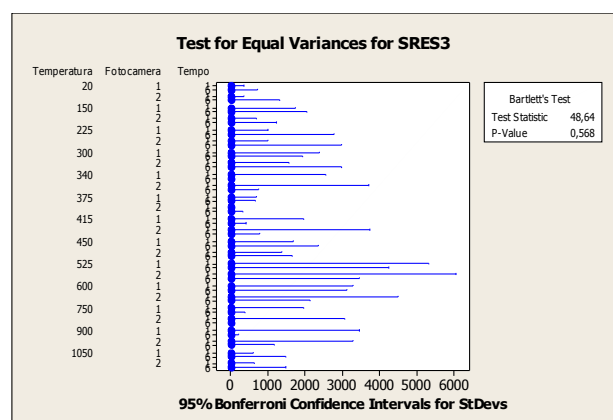
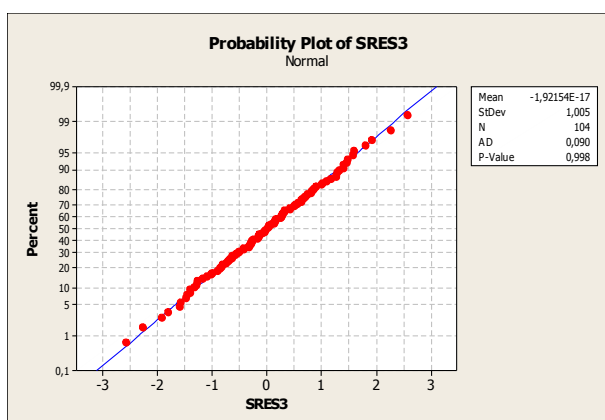


Fig. 4.445 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

La verifica di normalità dei residui risulta superata così come il test di omogeneità in varianza.

#### 4.2.4.5 – Analisi della media del canale blu

Come già fatto per i precedenti canali del rosso e del verde, anche per il canale blu viene analizzato un modello rispetto alle repliche per indagare la reale significatività di queste ultime. Si comincia dall'analisi dei grafici esplorativi:

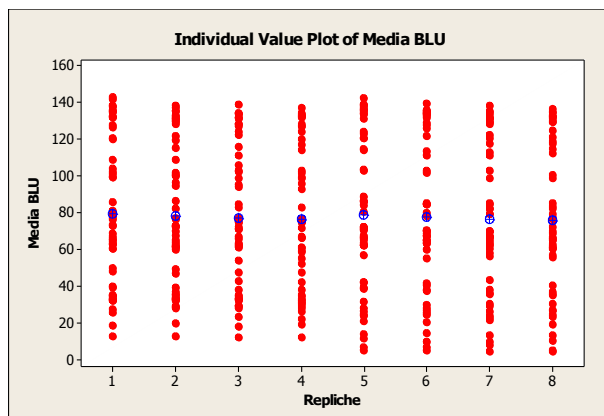


Fig. 4.446 – Grafico dei valori della media del canale blu rispetto al fattore.

La media delle otto repliche sembra non influenzare il risultato.

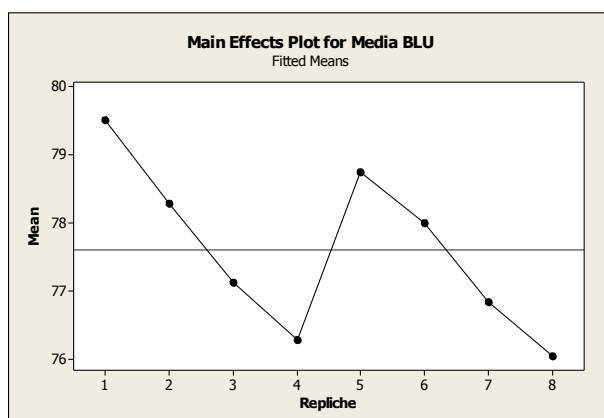


Fig. 4.447 – Grafico dei valori della media rispetto all'effetto principale.

Dalla scala dell'asse delle ordinate si intuisce che il fattore non influenza il risultato. I risultati quantitativi verranno esposti dalla seguente tabella ANOVA:

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F-test	p-value
Repliche	7	551	551	79	0,05	1,000
Errore	408	666595	666595	1634		
Totale	415	667146				
S = 40,4204		R-Sq = 0,08%		R-Sq (adj) = 0,00%		

Tabella 4.13 – Tabella ANOVA della media del canale blu rispetto alle repliche.

La tabella ANOVA ci suggerisce che il fattore non influenza il risultato e che il modello non è assolutamente spiegato dai dati. Di seguito vengono eseguite le verifiche sui residui:

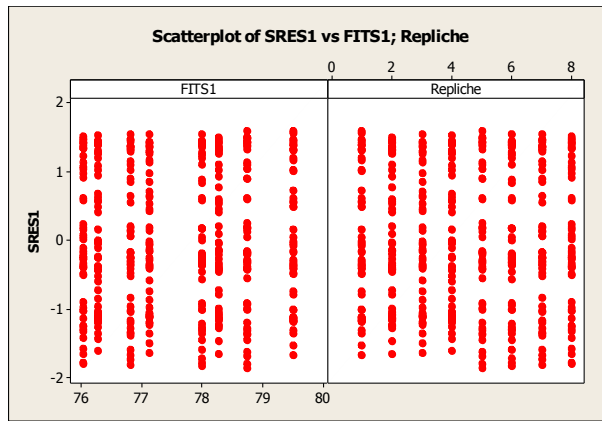


Fig. 4.448 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e al fattore.

Non vengono evidenziati dati eccezionali e la dispersione risulta essere omogenea.

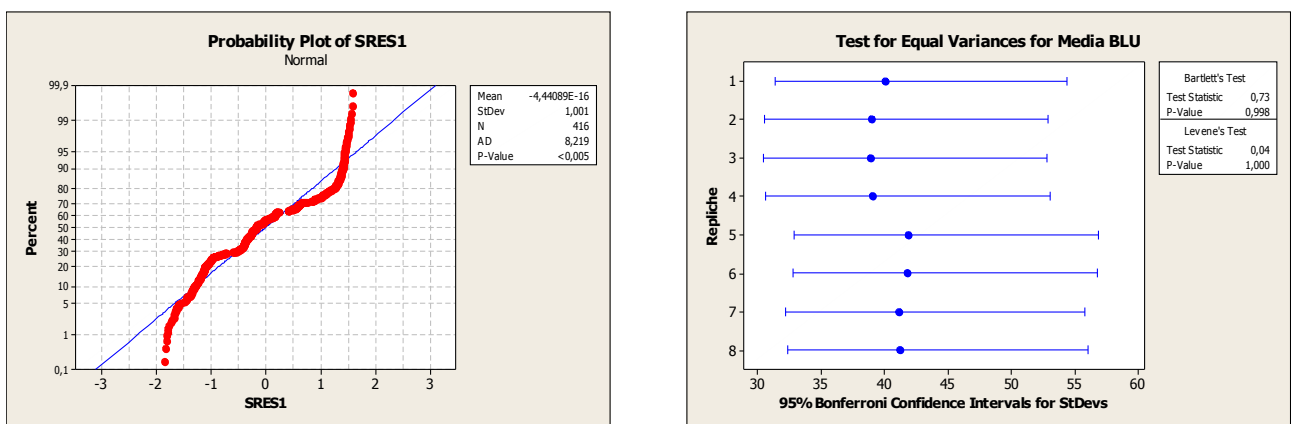


Fig. 4.449 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

I residui risultano non normalmente distribuiti, ma di varianza praticamente identica. Di seguito viene svolta l'analisi con una sola replica per condizione sperimentale.

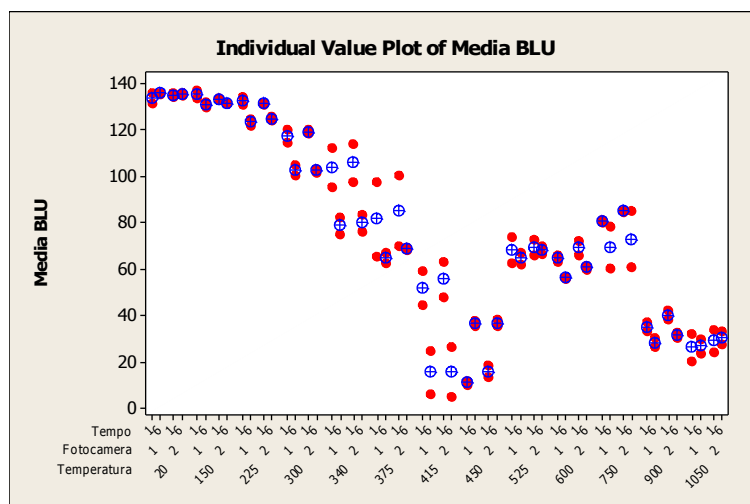


Fig. 4.450 – Grafico dei valori della media del canale blu rispetto ai fattori.

Dal grafico si può ipotizzare un'influenza molto marcata della temperatura rispetto agli altri due fattori. Questa supposizione dovrà essere confermata prima in via qualitativa, dai grafici degli effetti principali e da quello delle interazioni, e poi in modo quantitativo dall'ANOVA.

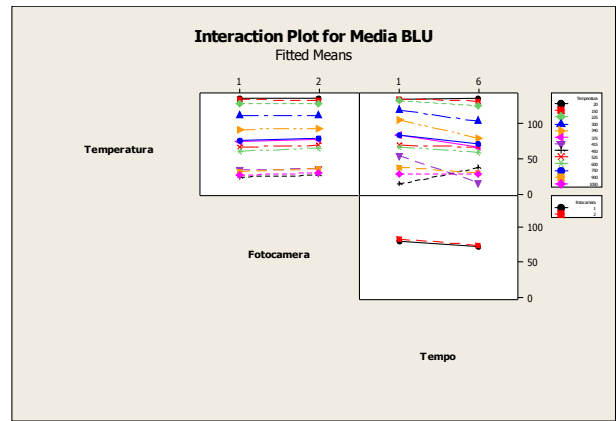
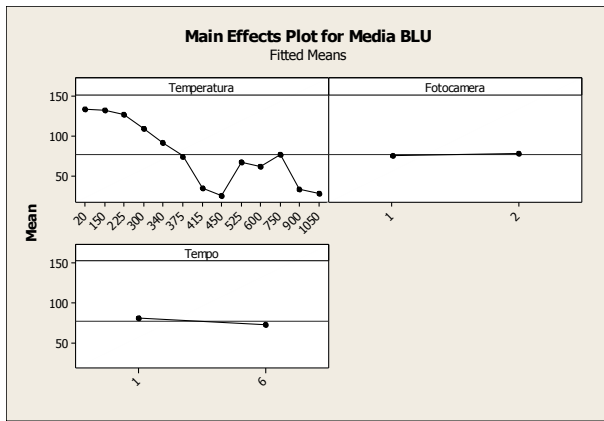


Fig. 4.451 – Grafico dei valori della media rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b).

Il grafico degli effetti principali ci conferma che la temperatura influisce in modo maggiore rispetto agli altri fattori e, il grafico delle interazioni, che l'interazione tra tempo e temperatura possa essere significativa.

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F - test	p-value
Temperatura	12	155395,9	155395,9	12949,7	241,29	0,000
Fotocamera	1	127,8	127,8	127,8	2,38	0,129
Tempo	1	1922,2	1922,2	1922,2	35,82	0,000
Temperatura*fotocamera	12	66,2	66,2	5,5	0,10	1,000
Temperatura*Tempo	12	5080,3	5080,3	423,4	7,89	0,000
Fotocamera*Tempo	1	2,5	2,5	2,5	0,05	0,832
Temperatura*Tempo*Fotocamera	12	31,7	31,7	2,6	0,05	1,000
Errore	52	2790,8	2790,8	53,7		
Totale	103	165417,2				
S = 7,32587		R-Sq = 98,31%		R-Sq (adj) = 96,66%		

Tabella 4.14 – Tabella ANOVA della media del canale blu rispetto a temperatura, tempo e fotocamera.

L'analisi della varianza ci indica che un modello opportuno può essere un modello completo in due fattori, temperatura e tempo, in cui viene considerata anche l'interazione. Di seguito vengono eseguite le verifiche sui residui.

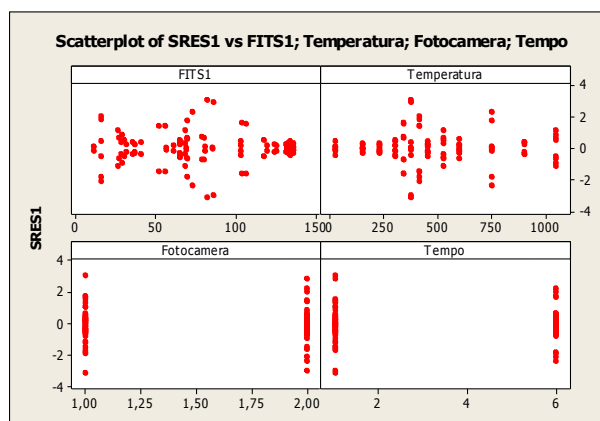


Fig. 4.452 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori.

Si notano alcuni residui con valore assoluto superiore a 3 e disomogeneità per quanto riguarda i livelli dei residui di temperatura.

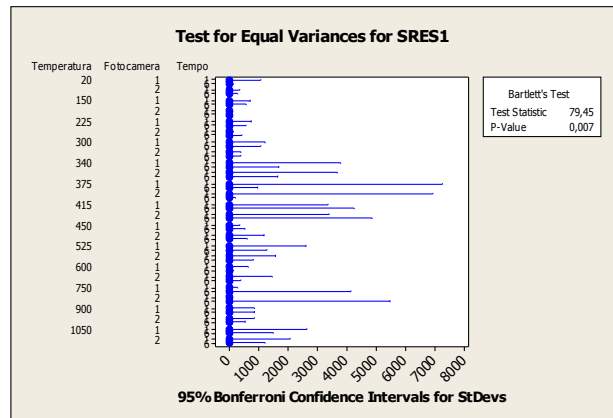
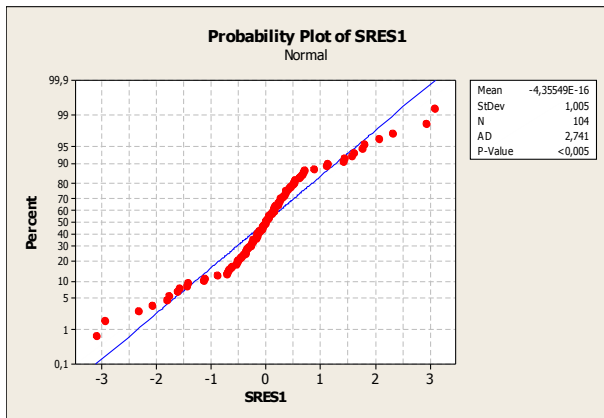


Fig. 4.453 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

La verifica di normalità non risulta superata così come quella di omogeneità della varianza. Si osservano dei residui con valori molto elevati alla temperatura di 375°C e di 750°C.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva del test di Tukey per il confronto a coppie:

	20 - 1	20 - 6	150 - 1	150 - 6	225 - 1	225 - 6	300 - 1	300 - 6	340 - 1	340 - 6	375 - 1	375 - 6	415 - 1	415 - 6	450 - 1	450 - 6	525 - 1	525 - 6	600 - 1	600 - 6	750 - 1	750 - 6	900 - 1	900 - 6	1050 - 1	1050 - 6	
20 - 1								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
20 - 6								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
150 - 1								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
150 - 6								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
225 - 1								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
225 - 6								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
300 - 1									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
300 - 6	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
340 - 1	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
340 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X					X			X	X	X	X
375 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X					X			X	X	X	X
375 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X							X	X	X	X	X
415 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X						X			X	X	X	X
415 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X				
450 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X				
450 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X				
525 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		X	X	X								X	X	X	X
525 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X								X	X	X	X
600 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X								X	X	X	X
600 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X						X		X	X	X	X
750 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X					X			X	X	X	X
750 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X								X	X	X	X
900 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X				
900 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X				
1050 - 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X				
1050 - 6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X				

Tabella 4.15 – Tabella riassuntiva del test di Tukey per il canale blu.

Anche in questo caso le caselle contrassegnate da una  $x$  indicano che i due livelli sono significativamente differenti. Il test ci suggerisce che fino alla temperatura di 300°C non si rilevano differenze; così come non ci sono differenze tra 900°C e 1050°C.

#### 4.2.4.6 – Analisi della deviazione standard del canale blu

Anche per il canale del blu viene svolta l'ANOVA della deviazione standard che, è bene ricordare, mette in evidenza l'omogeneità del colore della superficie del provino.

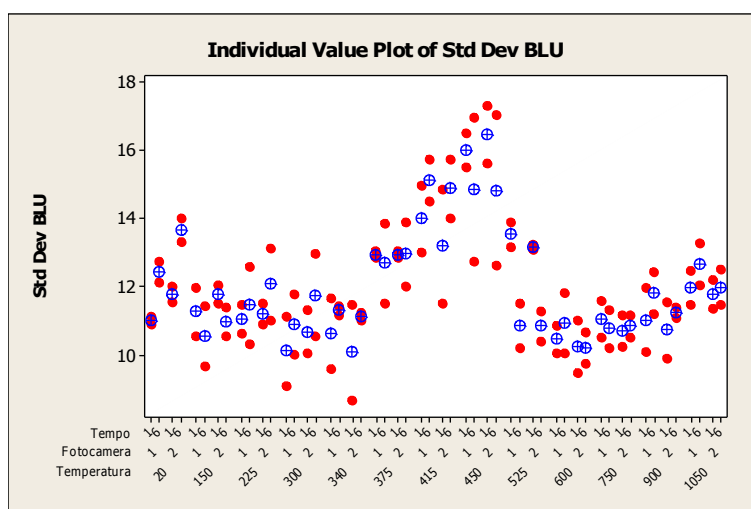


Fig. 4.454 – Grafico dei valori della media del canale blu rispetto ai fattori.

Come si può vedere dal grafico la temperatura sembra influire sulla deviazione standard in modo maggiore rispetto agli altri fattori.

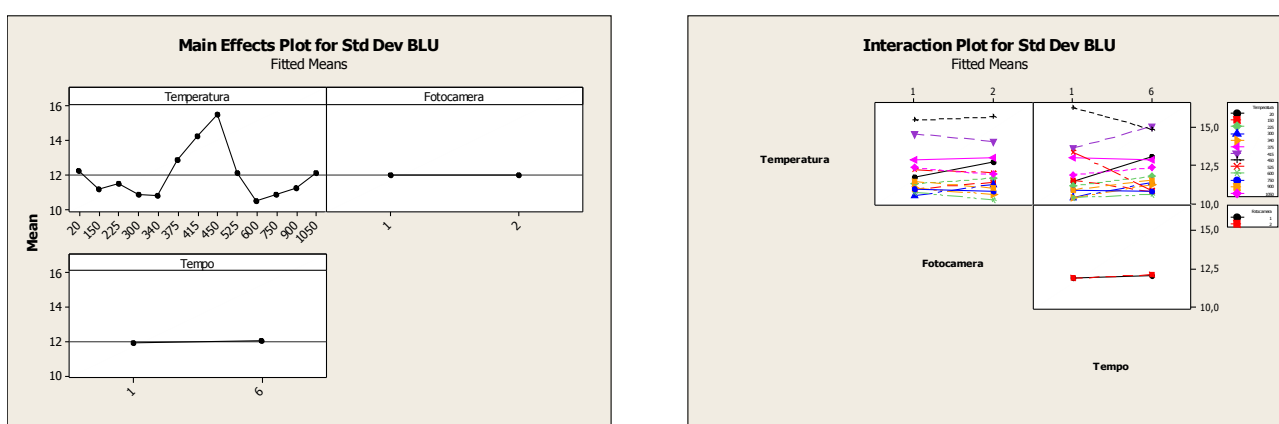


Fig. 4.455 – Grafico dei valori della media rispetto agli effetti principali a) e delle interazioni b).

Il grafico degli effetti principali ci conferma che la temperatura influisce maggiormente sulla deviazione standard, mentre il secondo grafico evidenzia come anche le interazioni sembrano essere significative. Di seguito viene riportata la tabella ANOVA:

Fattori	Gradi di libertà	SS	Adj SS	Adj MS	F - test	p-value
---------	------------------	----	--------	--------	----------	---------

Temperatura	12	212,46	212,46	17,70	13,22	0,000
Fotocamera	1	0,02	0,02	0,02	0,01	0,905
Tempo	1	0,59	0,59	0,59	0,44	0,511
Temperatura*fotocamera	12	5,96	5,96	0,50	0,37	0,968
Temperatura*Tempo	12	31,50	31,50	2,62	1,96	0,048
Fotocamera*Tempo	1	0,07	0,07	0,07	0,05	0,826
Temperatura*Tempo*Fotocamera	12	0,99	0,99	0,08	0,06	1,000
Errore	52	69,67	69,67	1,34		
Totale	103	321,26				
S = 1,15747		R-Sq = 78,31%		R-Sq (adj) = 57,05%		

Tabella 4.16 – Tabella ANOVA della deviazione standard del canale blu rispetto a temperatura, tempo e fotocamera.

L'analisi della varianza conferma che la temperatura è l'unico fattore significativo. Di seguito vengono riportate le verifiche dei residui:

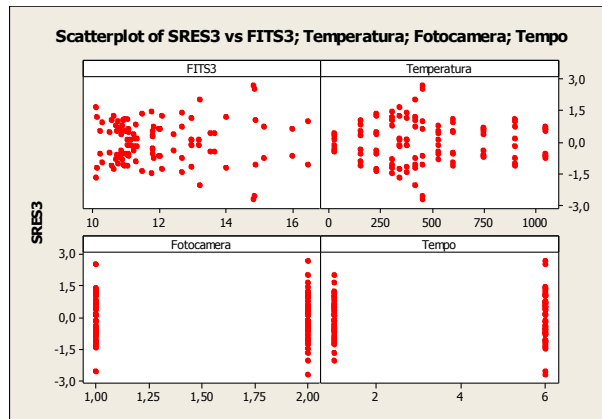


Fig. 4.456 – Grafico dei residui rispetto alle osservazioni e ai fattori.

Dal grafico non si evidenziano residui con valori in modulo maggiori di 3, ma alcuni dei residui del fattore temperatura sembrano avere una dispersione non omogenea.

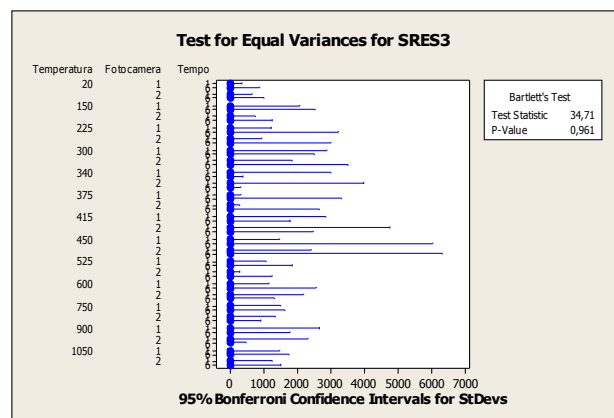
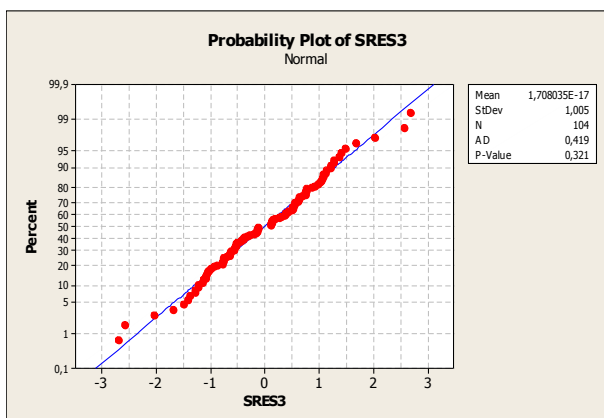


Fig. 4.457 – Grafico di probabilità normale a) e test dell'omogeneità della varianza b).

Entrambe le verifiche risultano superate senza particolari problemi.

### **4.3 – Bibliografia**

- Progettazione e analisi degli esperimenti  
[2005] – D.C. Montgomery
- Appunti del corso di miglioramento continuo delle tecnologie (Politecnico di Milano)  
[A.A. 2010/2011] – Q. Semeraro
- Il libro della fotografia digitale.  
[2007] – K. Scott



# Analisi struttura cristallina e ossidi superficiali

## 5.1 – Analisi struttura cristallina

La procedura sperimentale seguita dell'analisi della struttura cristallina dei campioni di lamiera di canna fumaria prevede:

- taglio a freddo di un campione de un lamierino (eseguito mediante cesoia manuale);
- inglobatura dei campioni tramite una resina termoindurente (resina “fenolica nera” prodotta da *bitech europe* – cod, *TEC-007-N*). Il ciclo termico, applicato alla pressione di 3.4Bar, è riportato in figura . . .

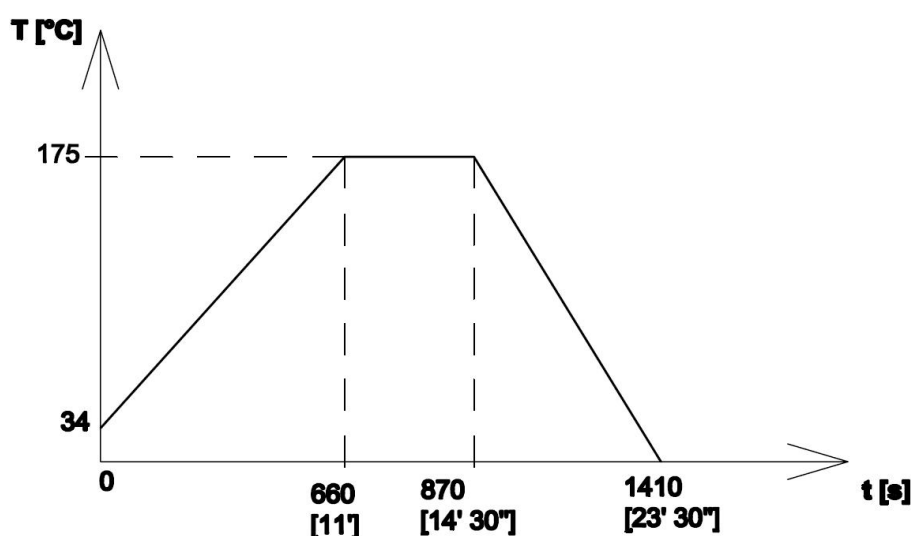


Fig. 5.1 – Ciclo termico di inglobatura.

- la lucidatura a specchio dei campioni tramite carte abrasive e panni diamantati di granulometria decrescente fino ad ottenere la rugosità superficiale di  $1\mu\text{m}$ .
- l'attacco metallografico per via chimica tramite immersione dei campione in una soluzione acquosa composta da: 5mL di  $\text{HNO}_3$  e 25mL di  $\text{HCl}$  diluiti in 15mL di  $\text{H}_2\text{O}$ .
- l'analisi al microscopio ottico.

Una volta inglobato, lucidato ed attaccato ogni campione è stato analizzato al microscopio

ottico. Di seguito vengono riportati i risultati dei campioni riscaldati per un'ora:

**20°C – 1 ora:** i grani hanno una dimensione ridotta che varia tra 15 e 50µm. Nella sezione longitudinale si intravedono le linee dovute al processo di laminazione;

**20°C – 1 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora

**150°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**150°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**225°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**225°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**300°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**300°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**340°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**340°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**375°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**375°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**415°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**415°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**450°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**450°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**525°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**525°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**600°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**600°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**750°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

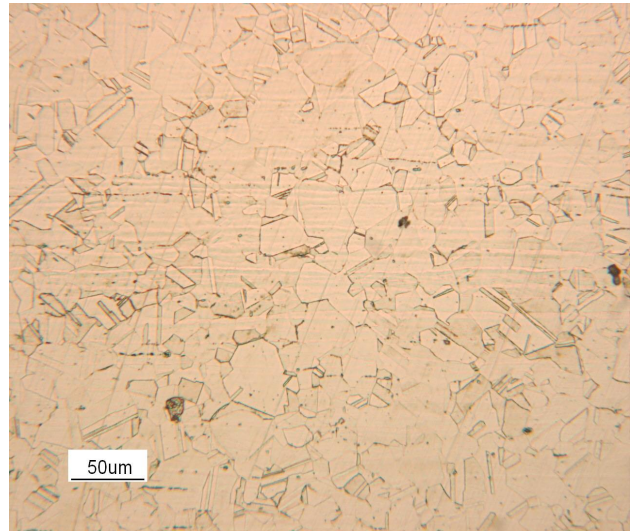
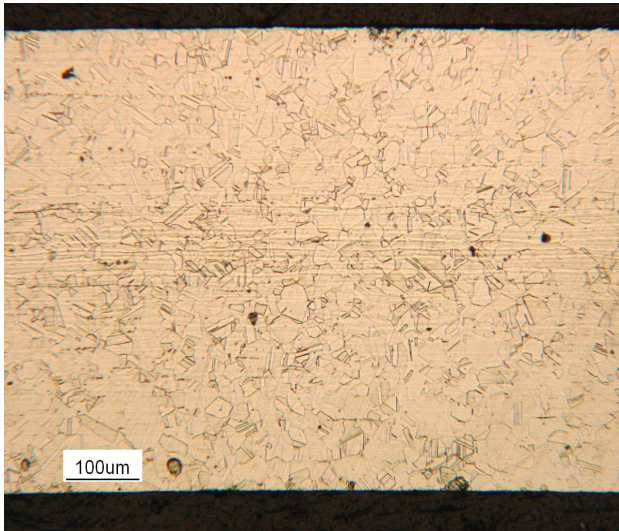
**750°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**900°C – 1 ora:** in alcune zone si nota un notevole ingrossamento del grano cristallino che in tali aree raggiunge dimensioni comprese tra 100 e 150µm circa, questa circostanza è attribuibile ai fenomeni di *recovery* e *ricristallizzazione*. Spariscono completamente le righe dovute alla laminazione;

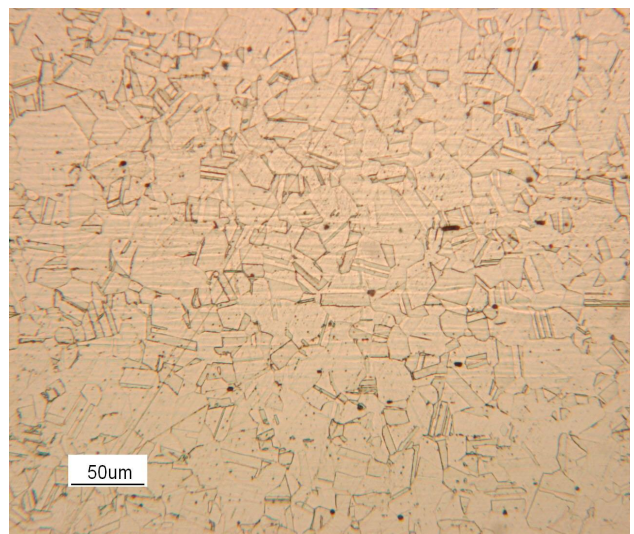
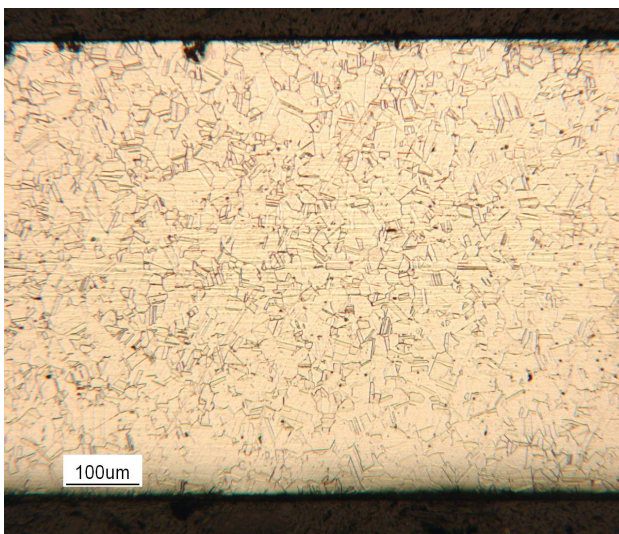
**900°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 900°C – 1 ora;

**1050°C – 1 ora:** in alcune zone si assiste ad un ulteriore aumento delle dimensioni del grano cristallino che in tali aree raggiunge dimensioni comprese tra 150 e 300µm;

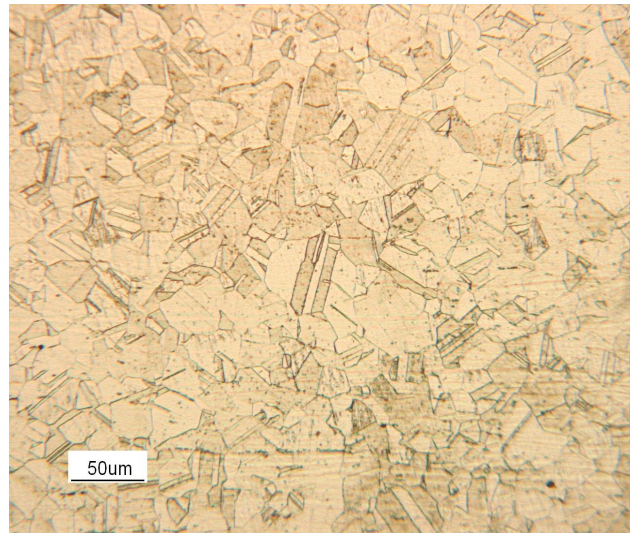
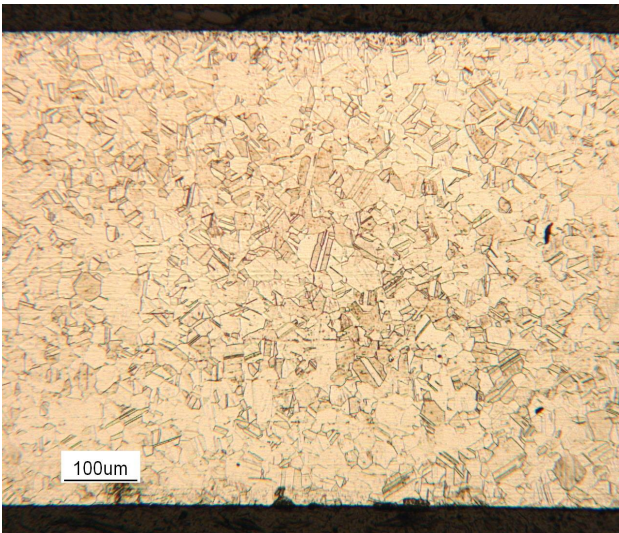
**1050°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 1050°C – 1 ora.



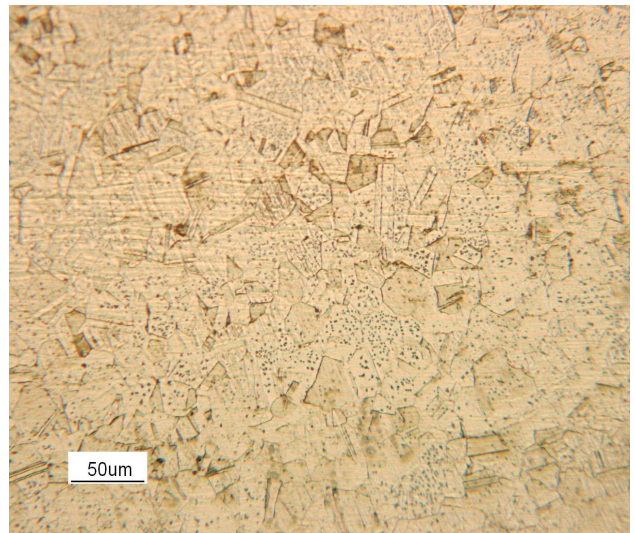
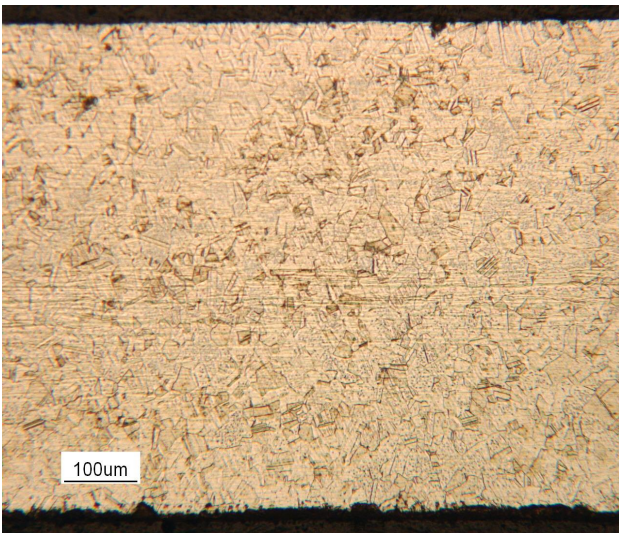
*Fig. 5.2 – Micrografia longitudinale del campione a 20°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



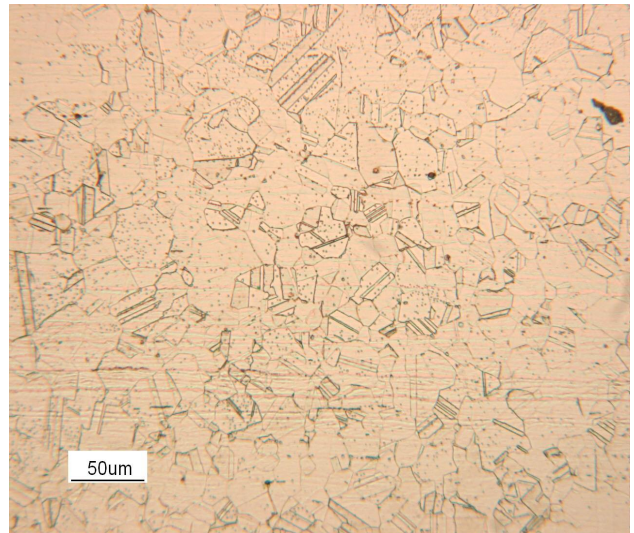
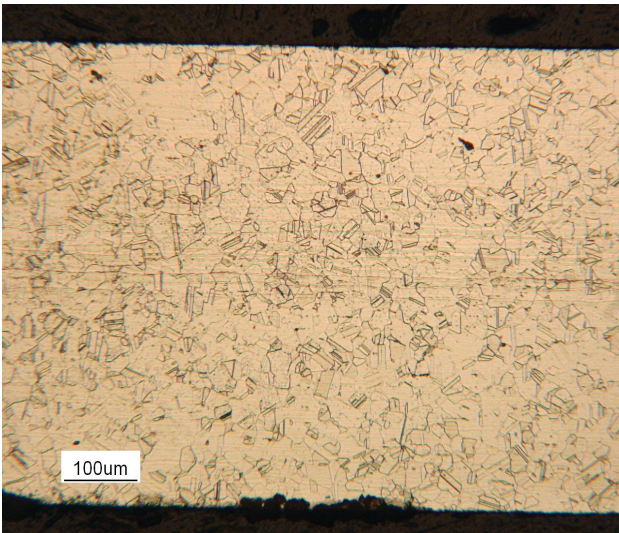
*Fig. 5.3 – Micrografia trasversale del campione a 20°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



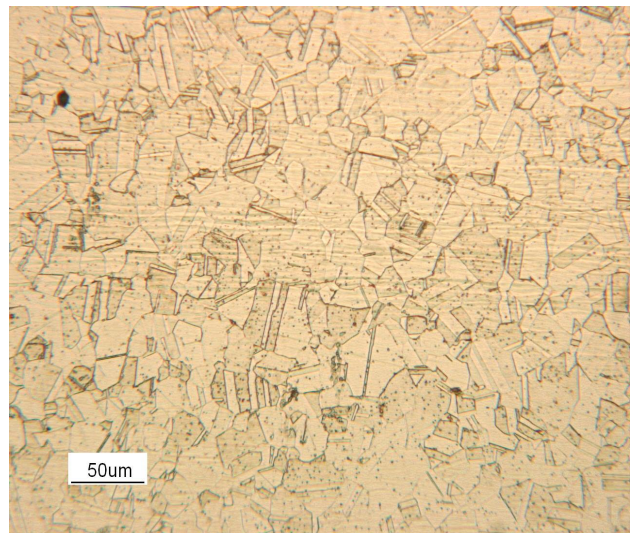
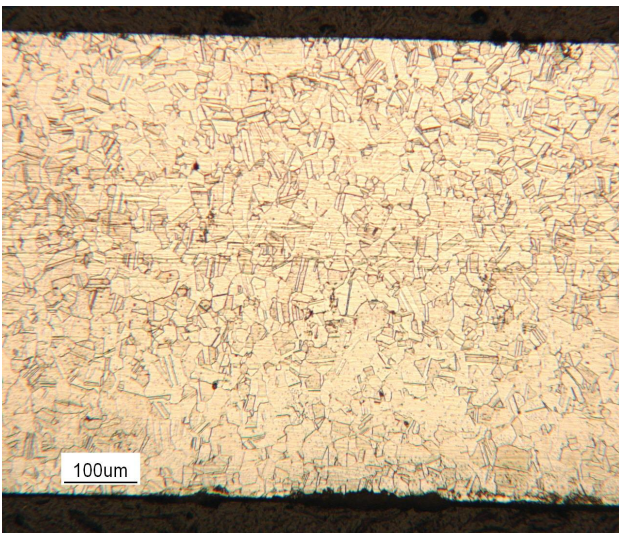
*Fig. 5.4 – Micrografia longitudinale del campione a 150°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



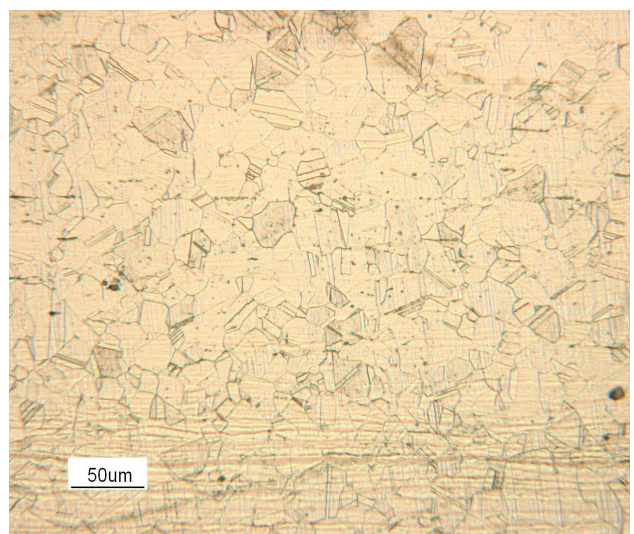
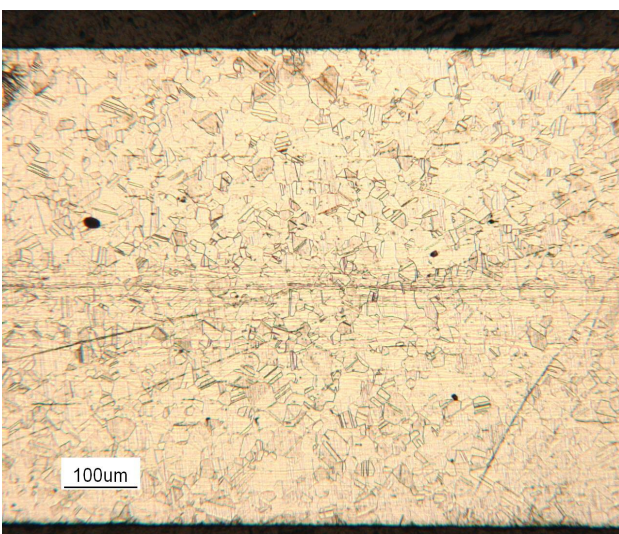
*Fig. 5.5 – Micrografia trasversale del campione a 150°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



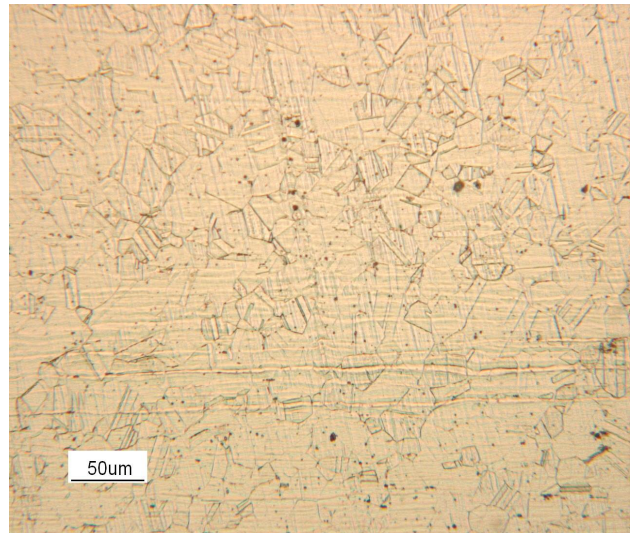
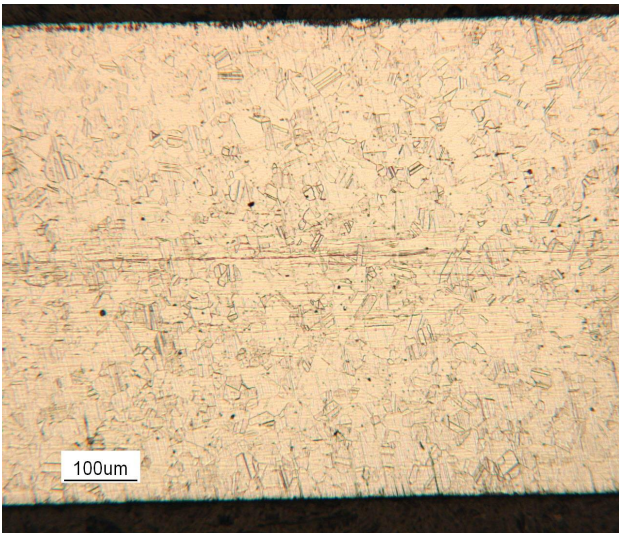
*Fig. 5.6 – Micrografia longitudinale del campione a 225°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



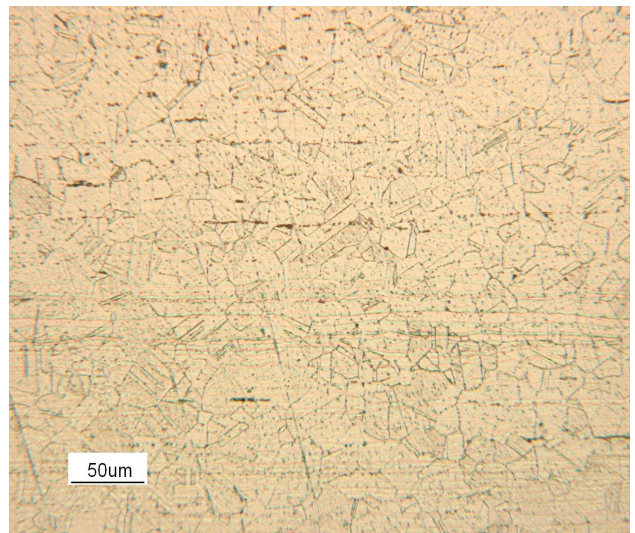
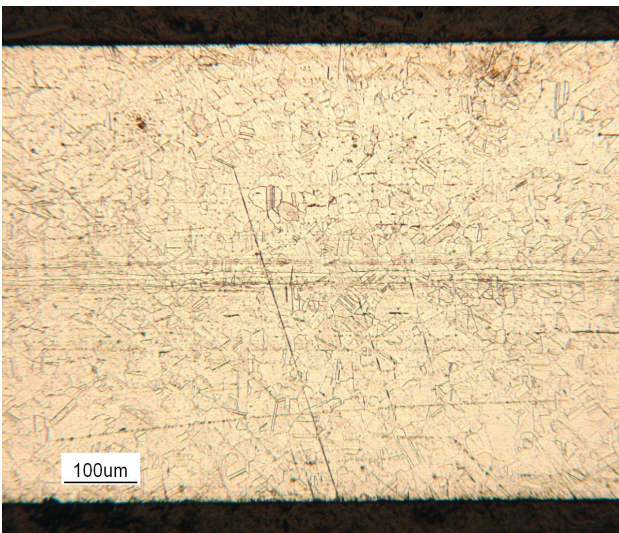
*Fig. 5.7 – Micrografia trasversale del campione a 225°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



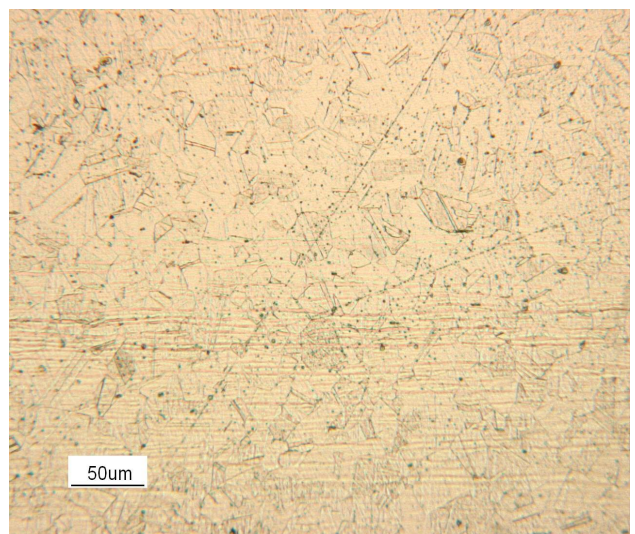
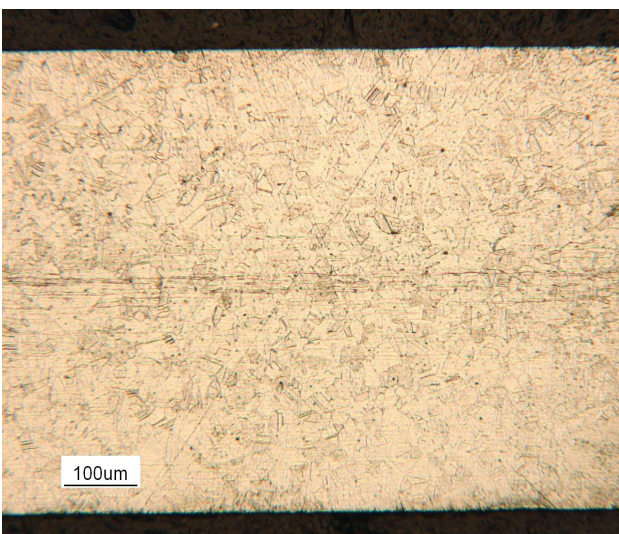
*Fig. 5.8 – Micrografia longitudinale del campione a 300°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



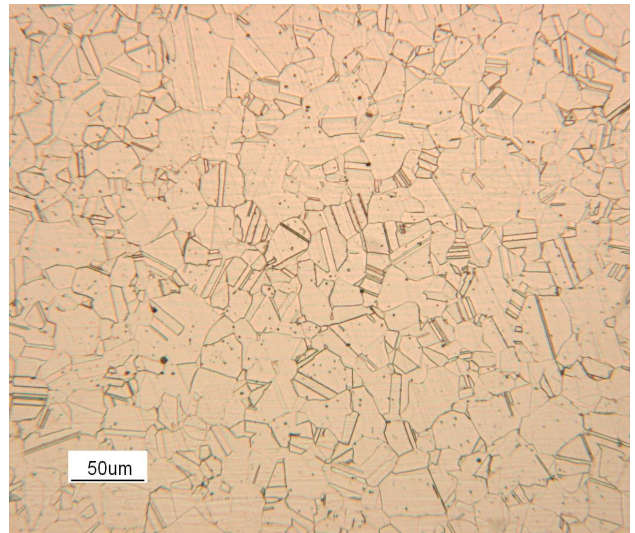
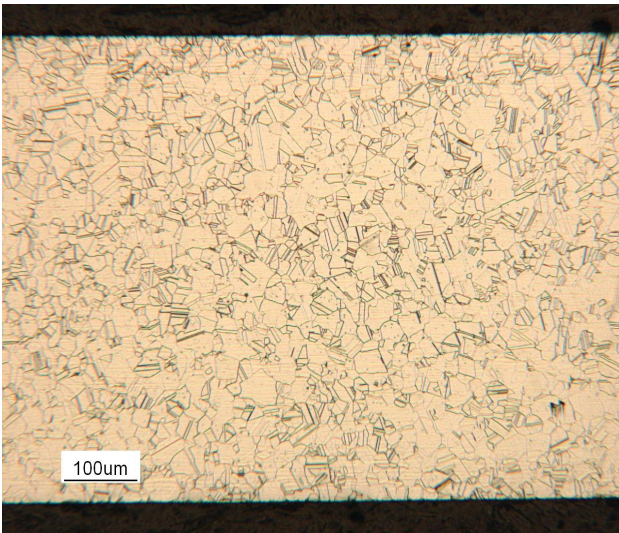
*Fig. 5.9 – Micrografia trasversale del campione a 300°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



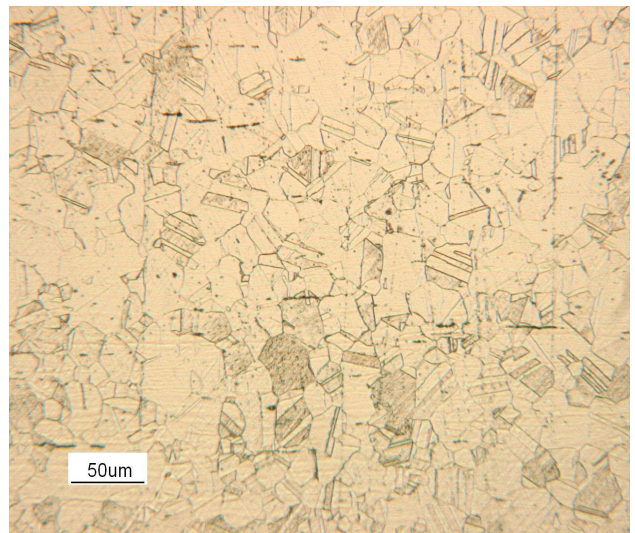
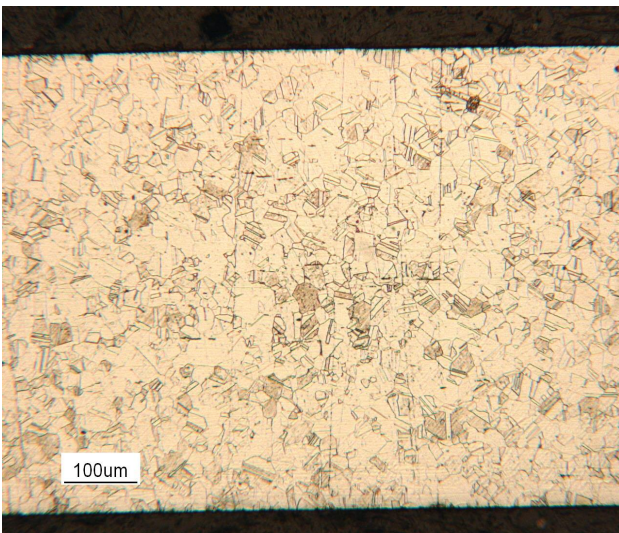
*Fig. 5.10 – Micrografia longitudinale del campione a 340°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



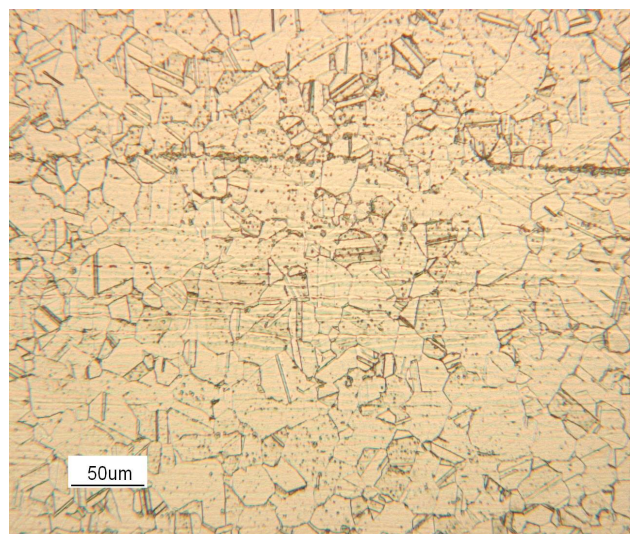
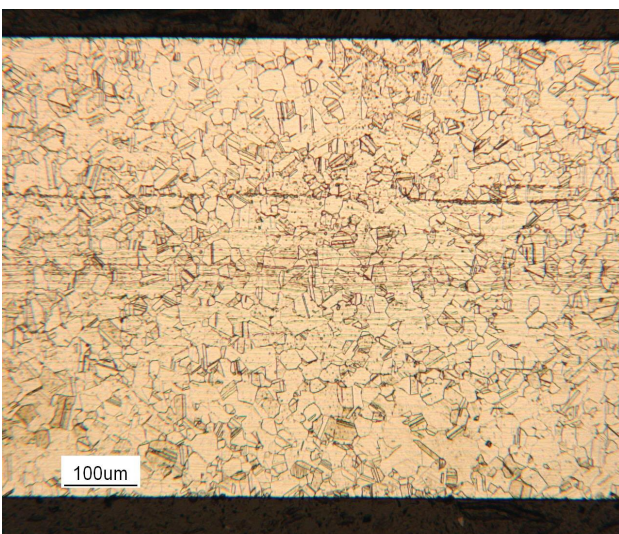
*Fig. 5.11 – Micrografia trasversale del campione a 340°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



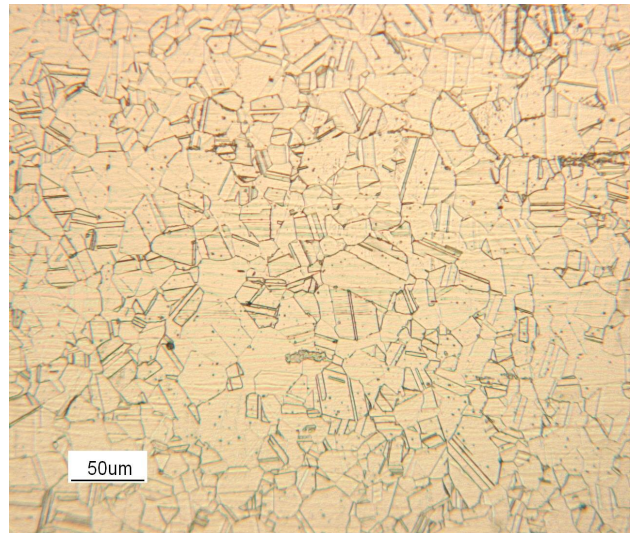
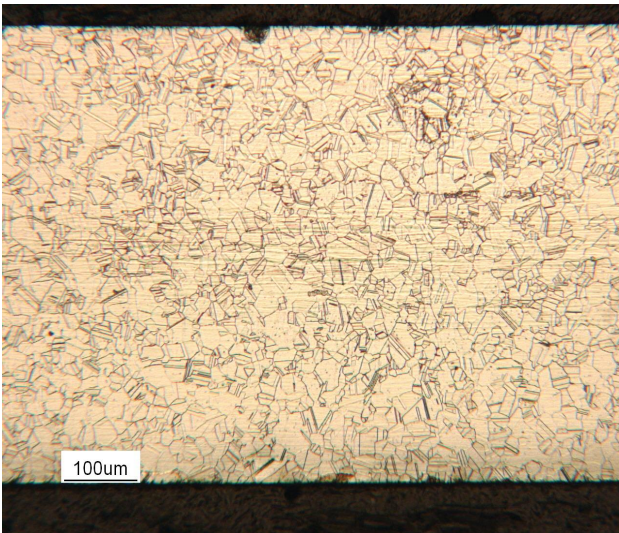
*Fig. 5.12 – Micrografia longitudinale del campione a 375°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



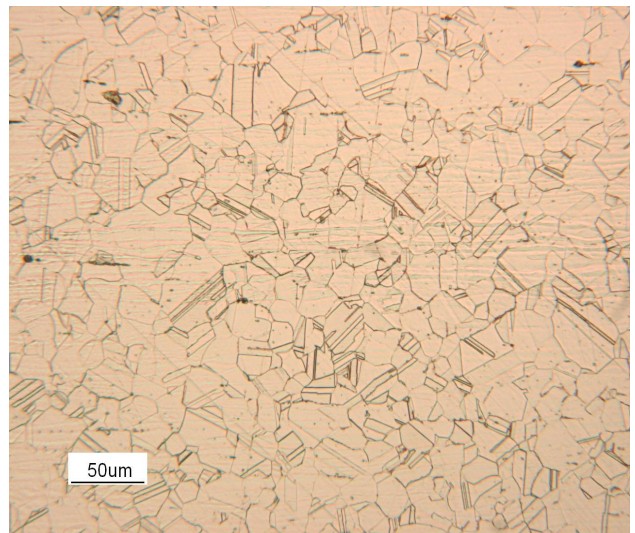
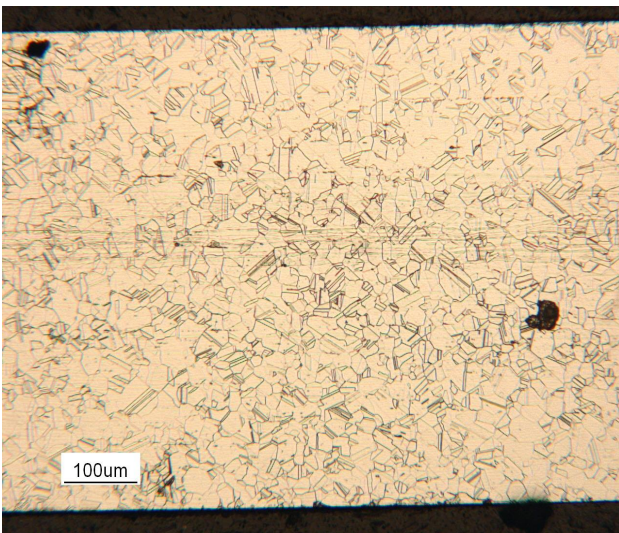
*Fig. 5.13 – Micrografia trasversale del campione a 375°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



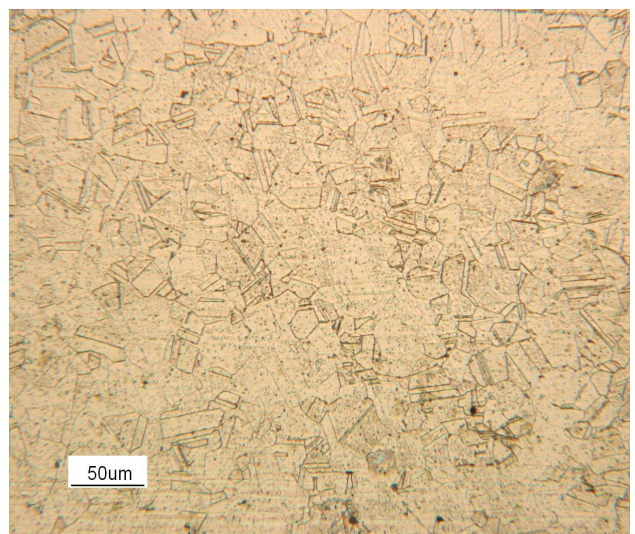
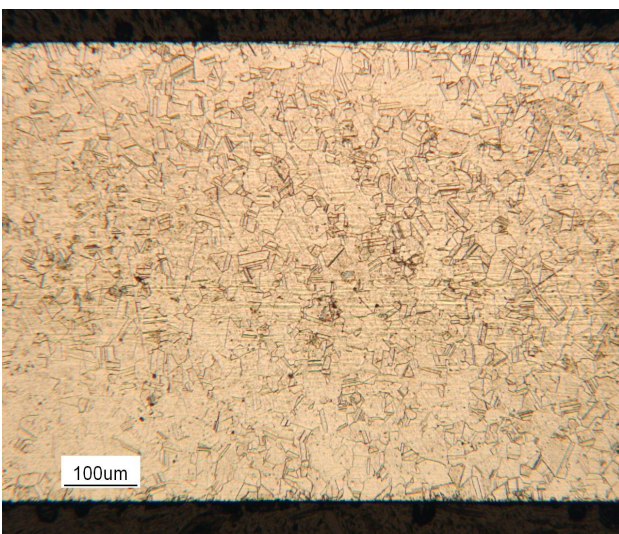
*Fig. 5.14 – Micrografia longitudinale del campione a 415°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



*Fig. 5.15 – Micrografia trasversale del campione a 415°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*

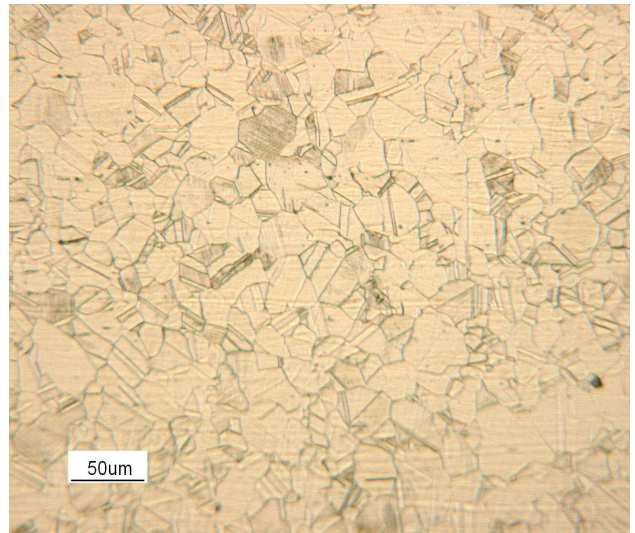
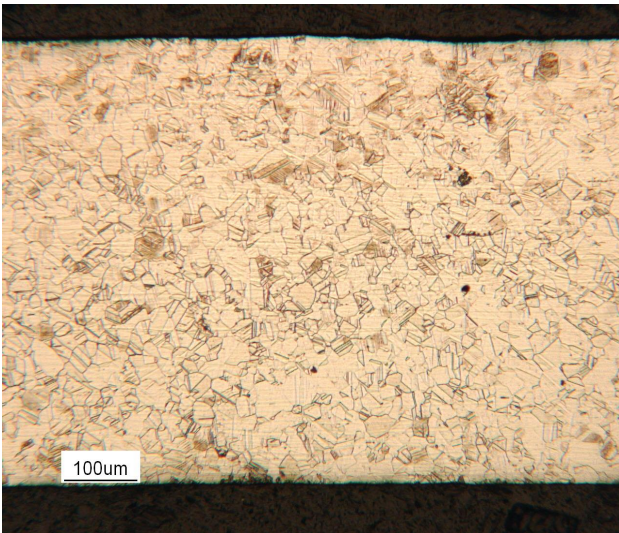


*Fig. 5.16 – Micrografia longitudinale del campione a 450°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*

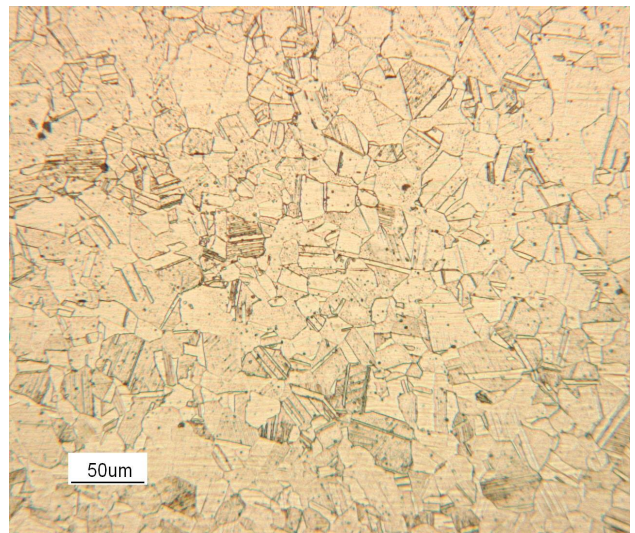
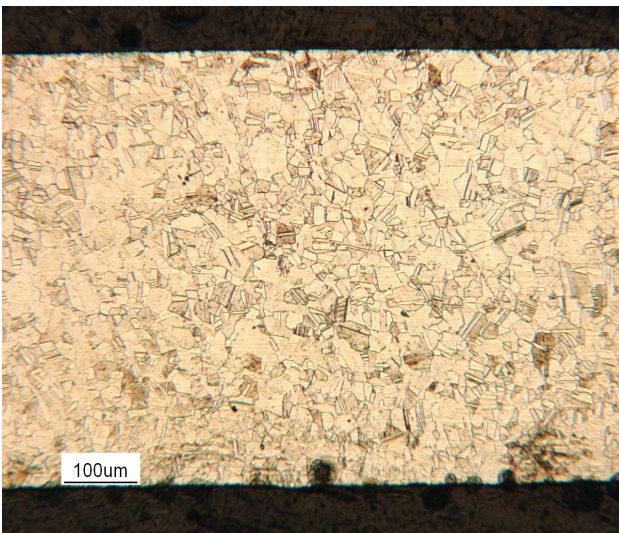


*Fig. 5.17 – Micrografia trasversale del campione a 450°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*

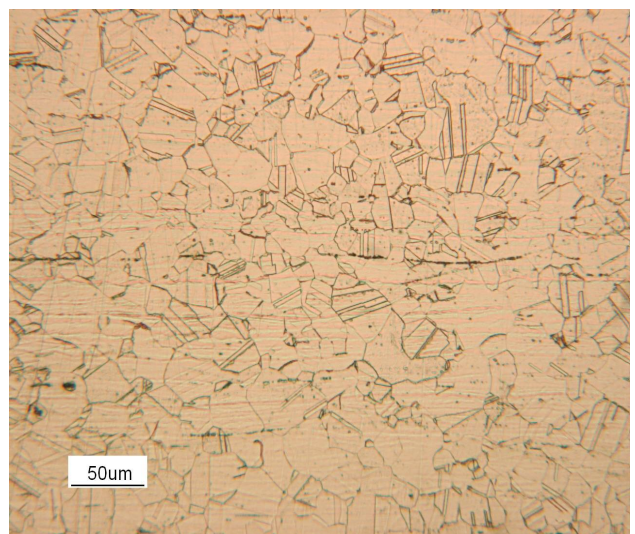
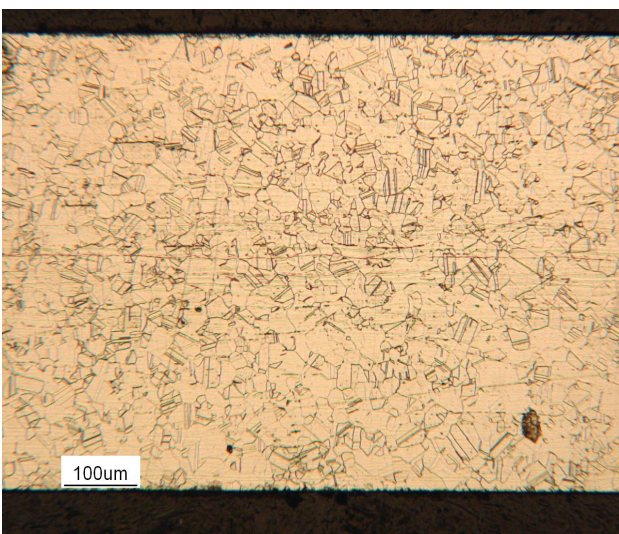




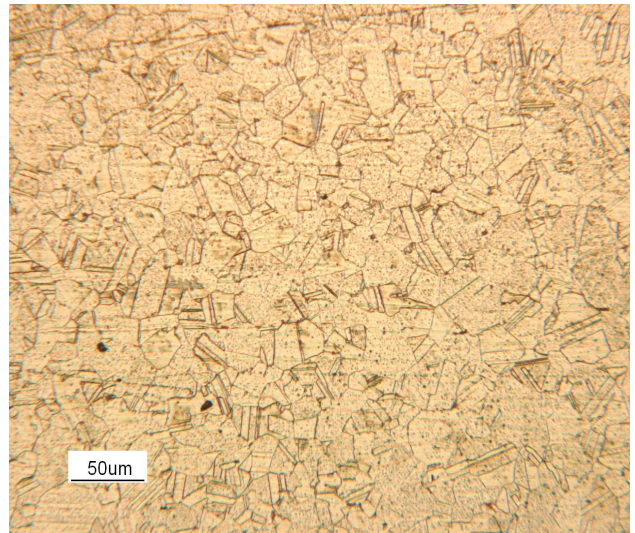
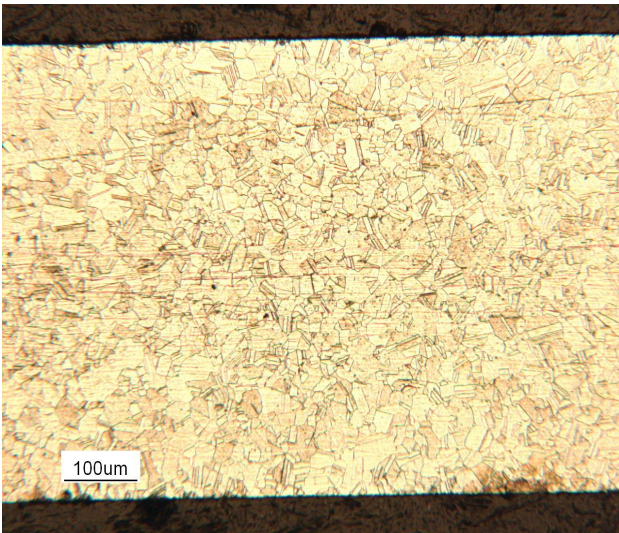
*Fig. 5.18 – Micrografia longitudinale del campione a 525°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



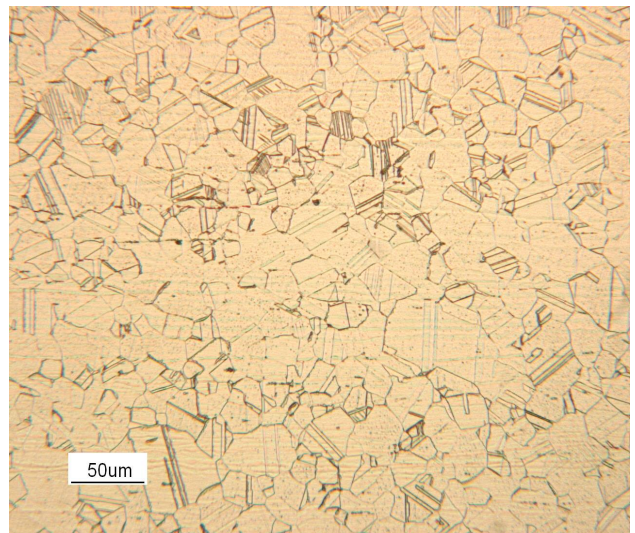
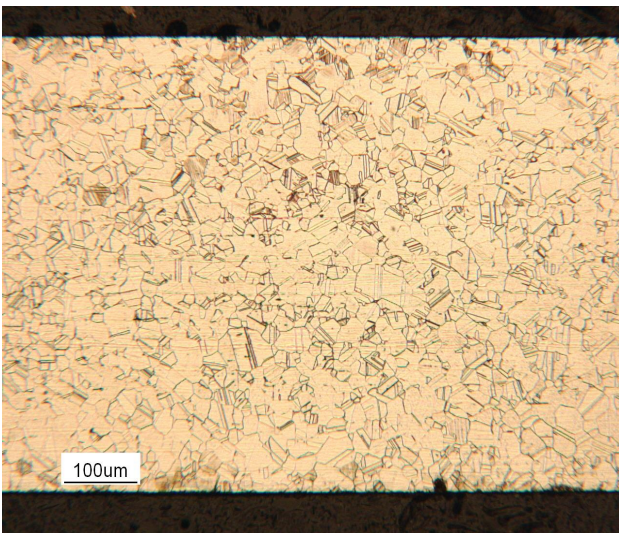
*Fig. 5.19 – Micrografia trasversale del campione a 525°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



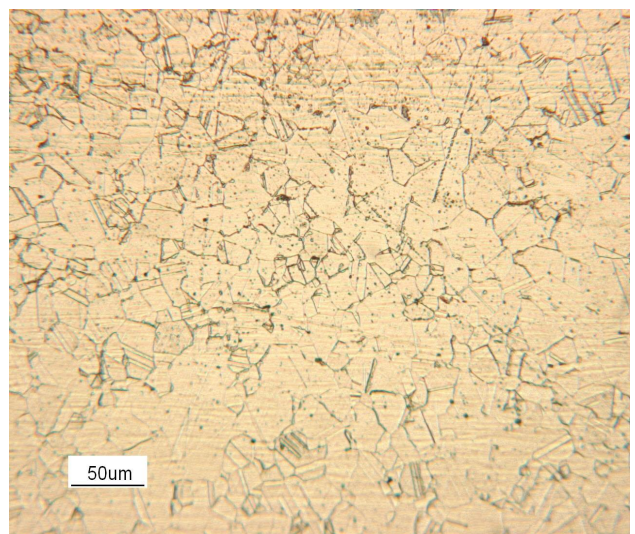
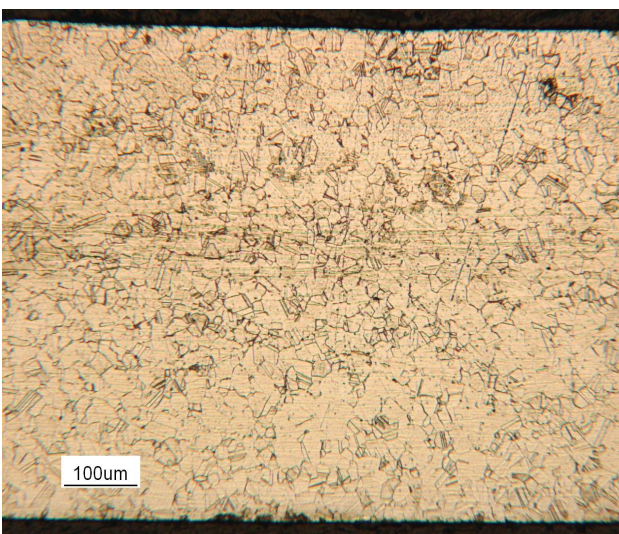
*Fig. 5.20 – Micrografia longitudinale del campione a 600°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



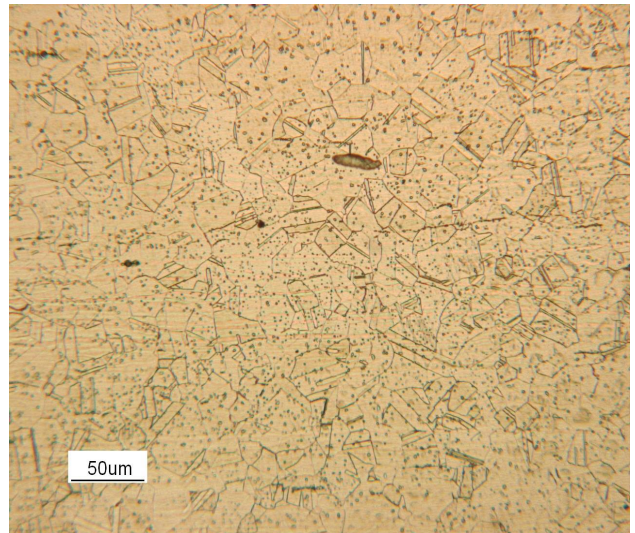
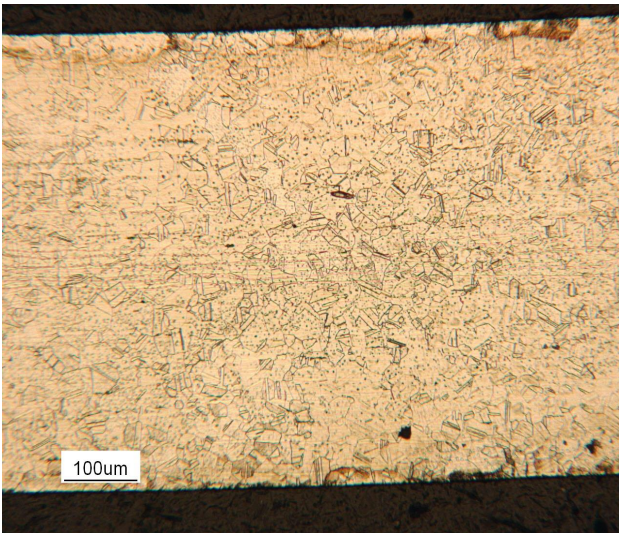
*Fig. 5.21 – Micrografia trasversale del campione a 600°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



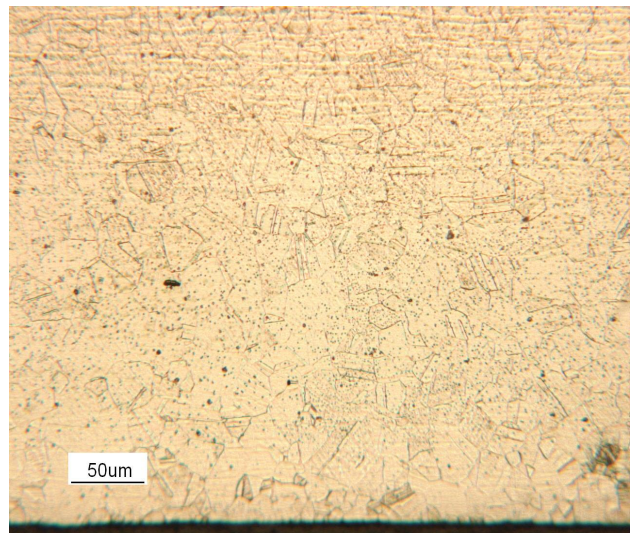
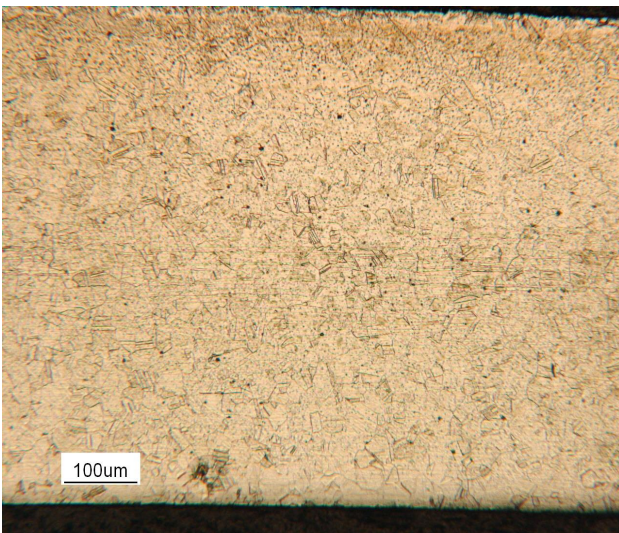
*Fig. 5.22 – Micrografia longitudinale del campione a 750°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



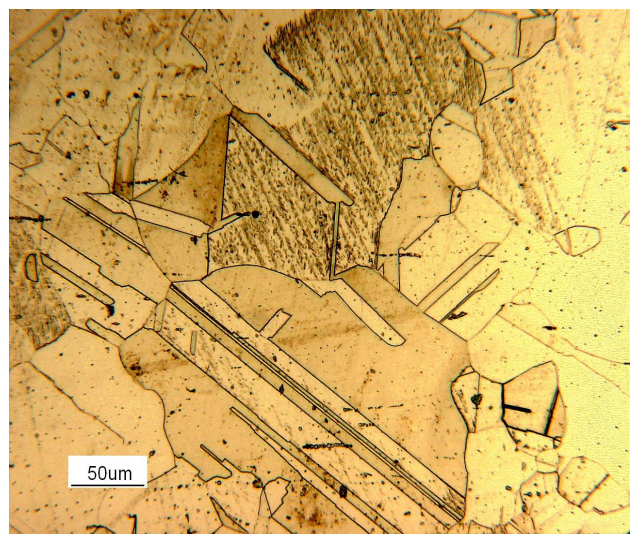
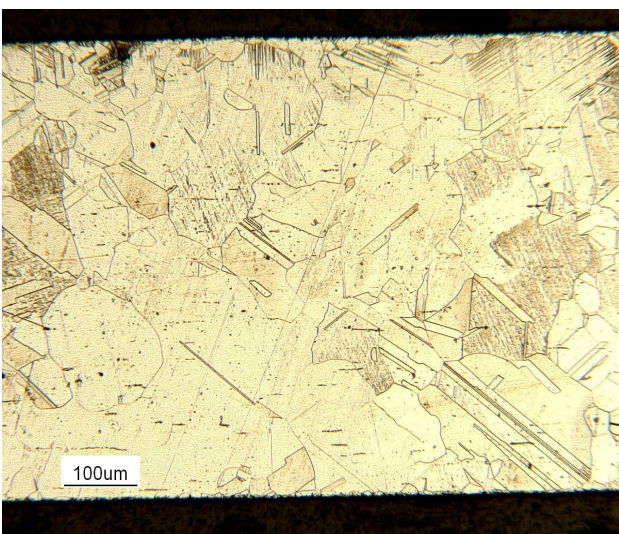
*Fig. 5.23 – Micrografia trasversale del campione a 750°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



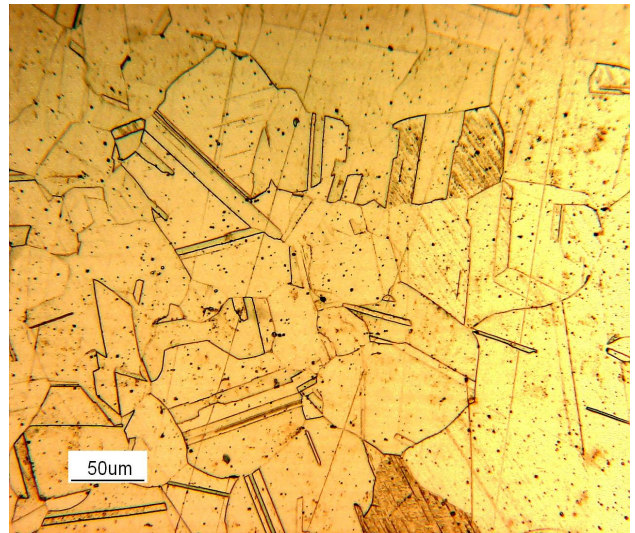
*Fig. 5.24 – Micrografia longitudinale del campione a 900°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



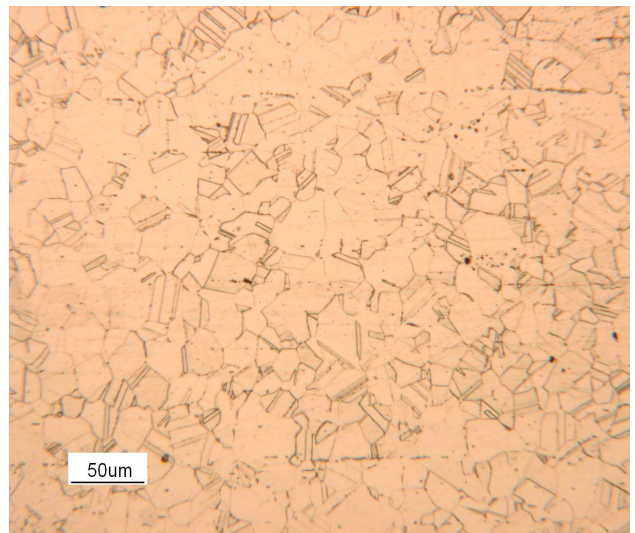
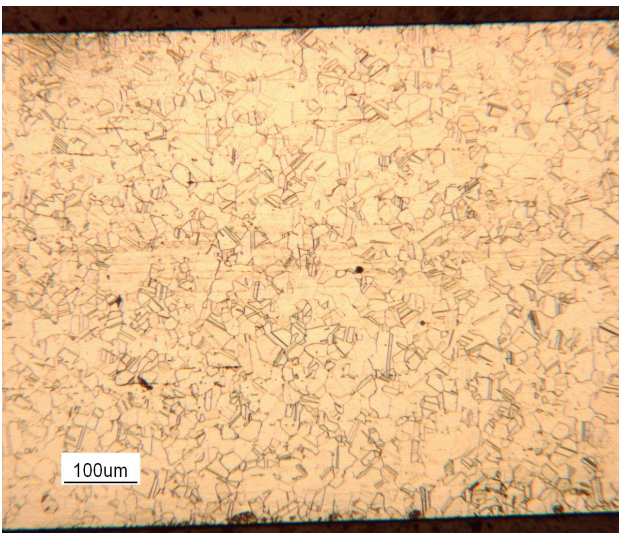
*Fig. 5.25 – Micrografia trasversale del campione a 900°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



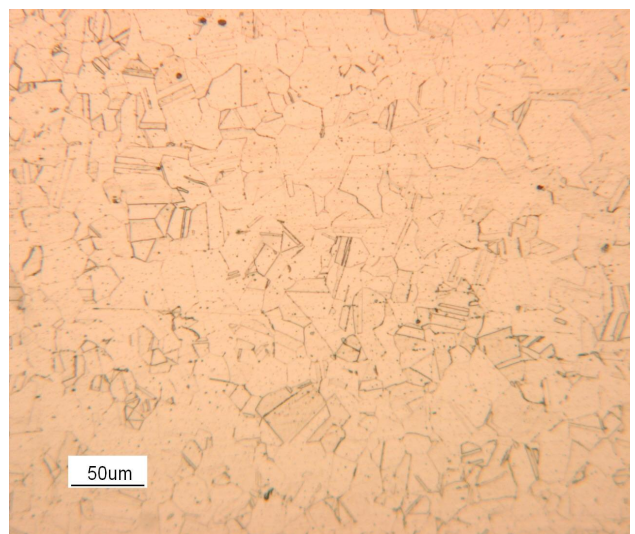
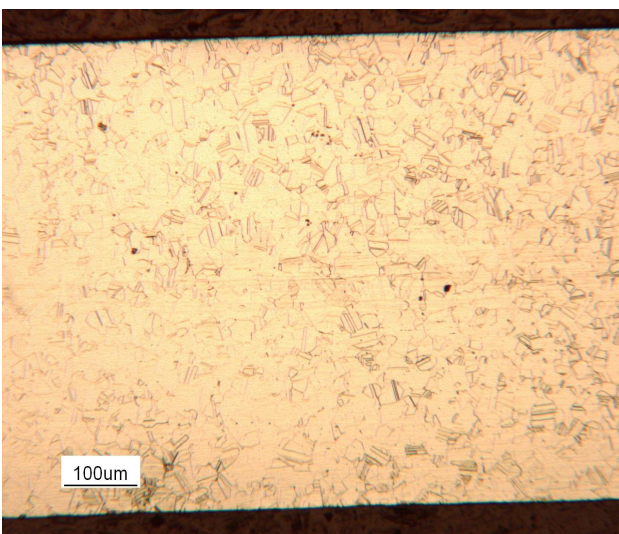
*Fig. 5.26 – Micrografia longitudinale del campione a 1050°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



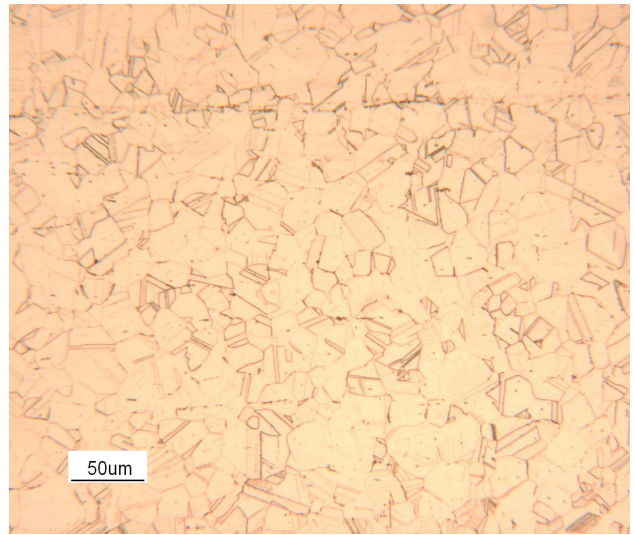
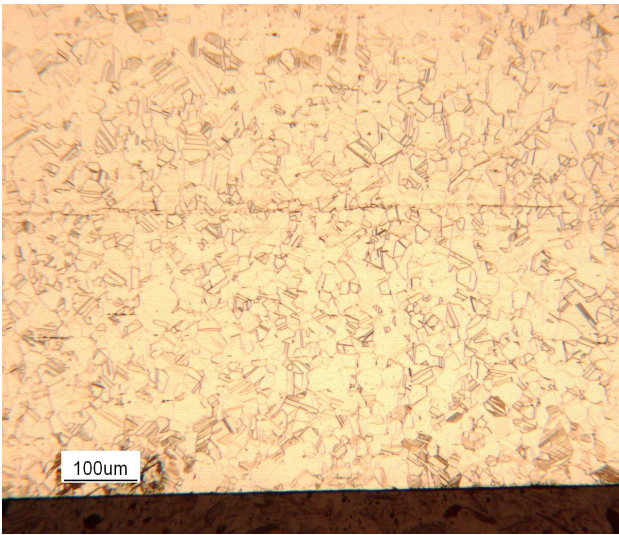
*Fig. 5.27 – Micrografia trasversale del campione a 1050°C per 1 ora. a) 100x e b) 200x.*



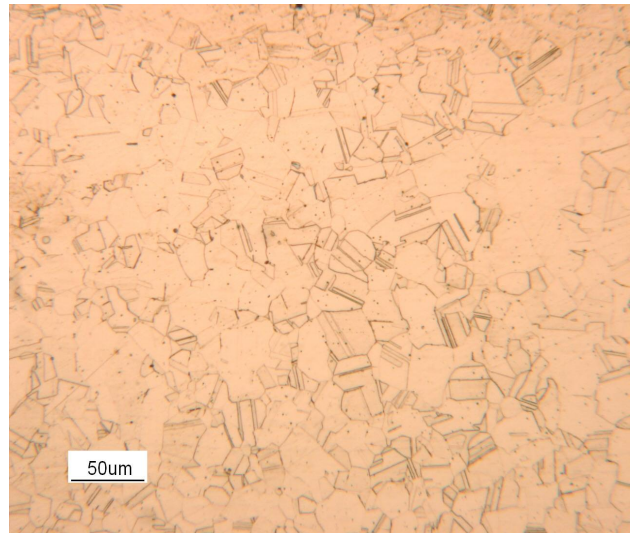
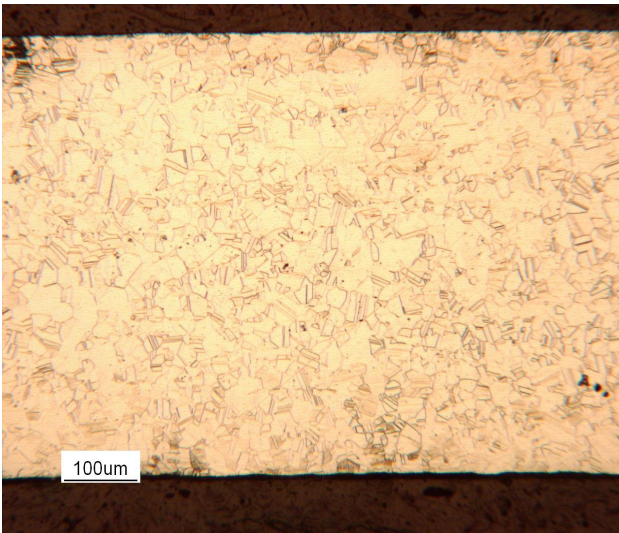
*Fig. 5.28 – Micrografia longitudinale del campione a 20°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



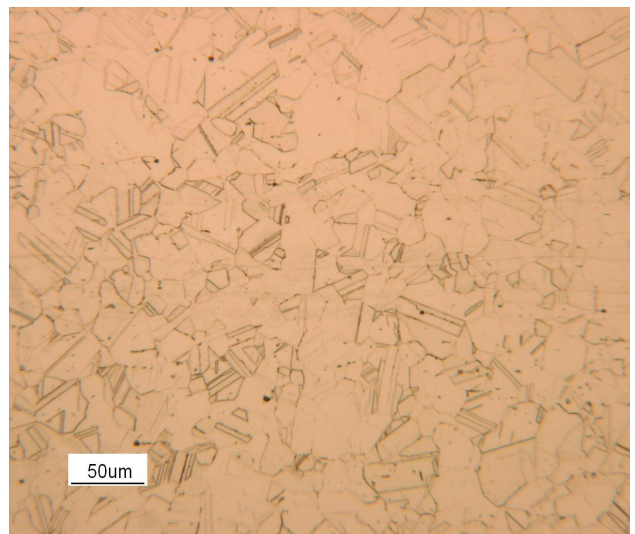
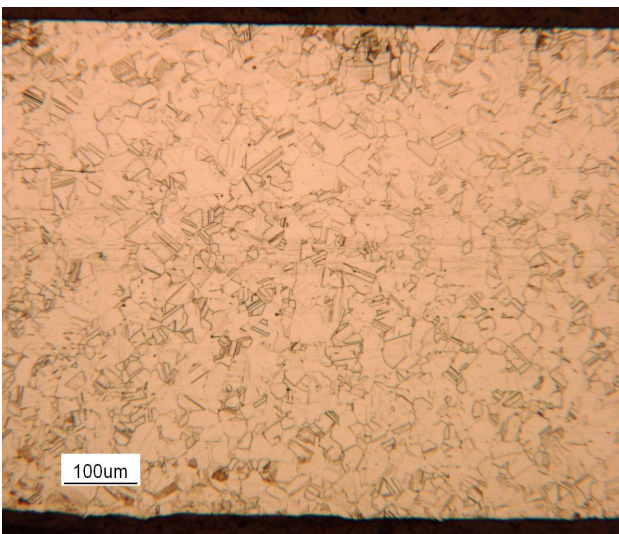
*Fig. 5.29 – Micrografia trasversale del campione a 20°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



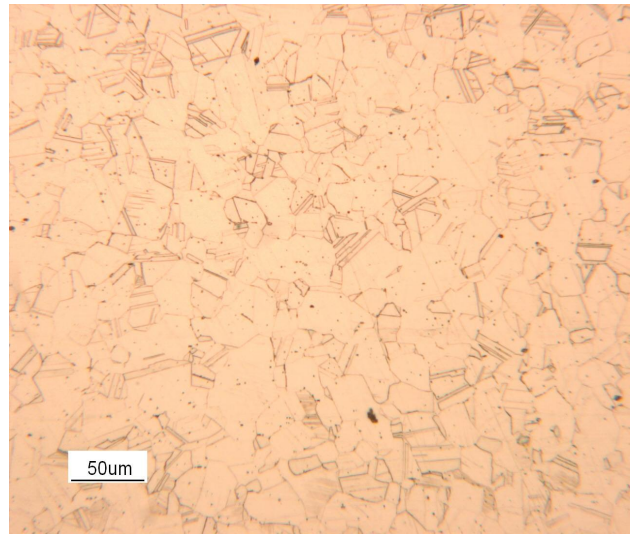
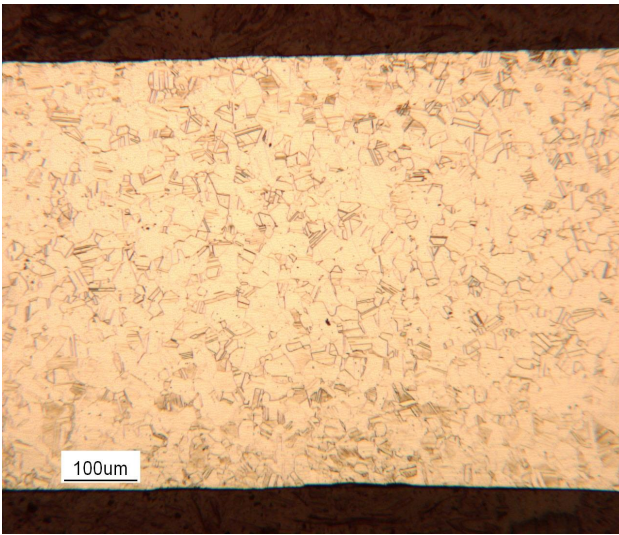
*Fig. 5.30 – Micrografia longitudinale del campione a 150°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



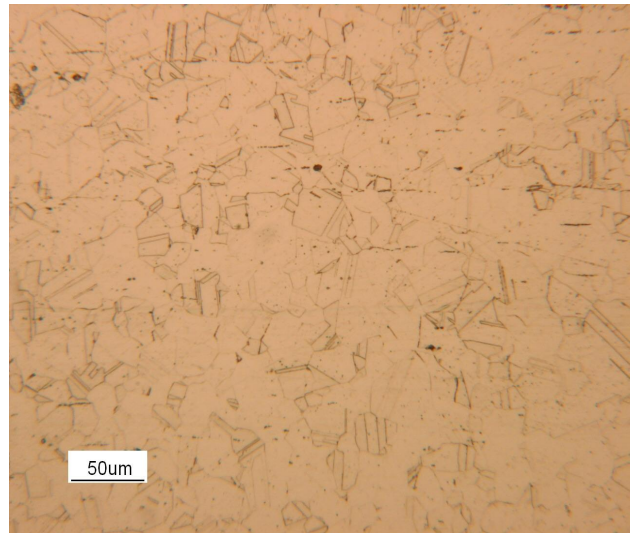
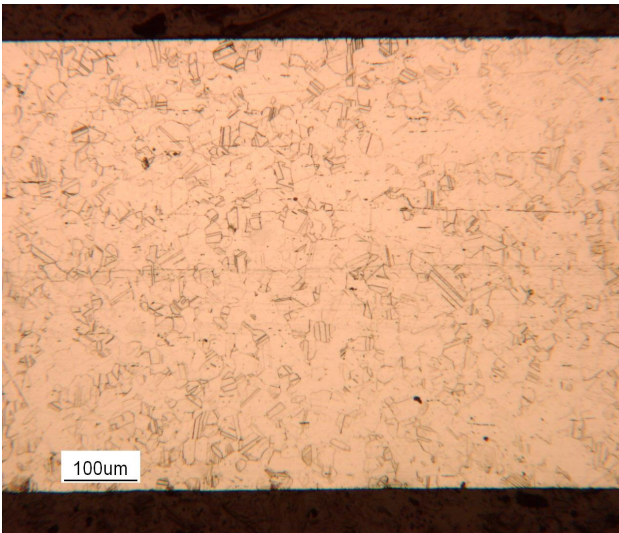
*Fig. 5.31 – Micrografia trasversale del campione a 150°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



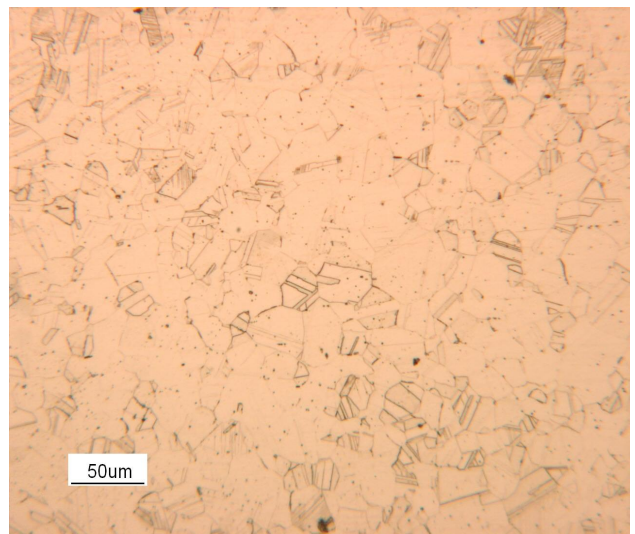
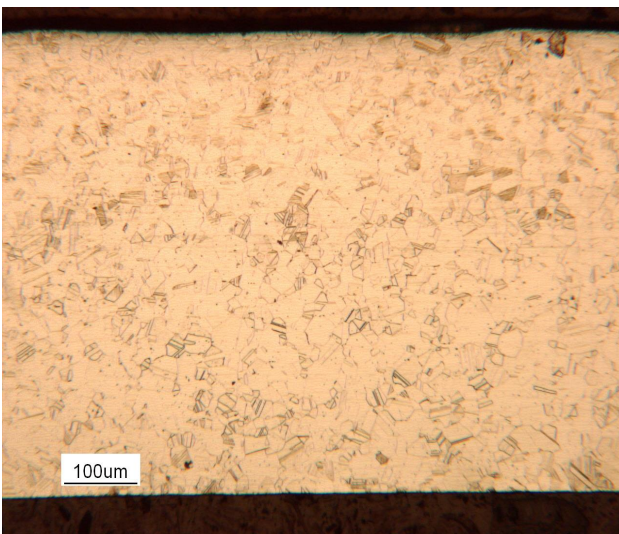
*Fig. 5.32 – Micrografia longitudinale del campione a 225°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



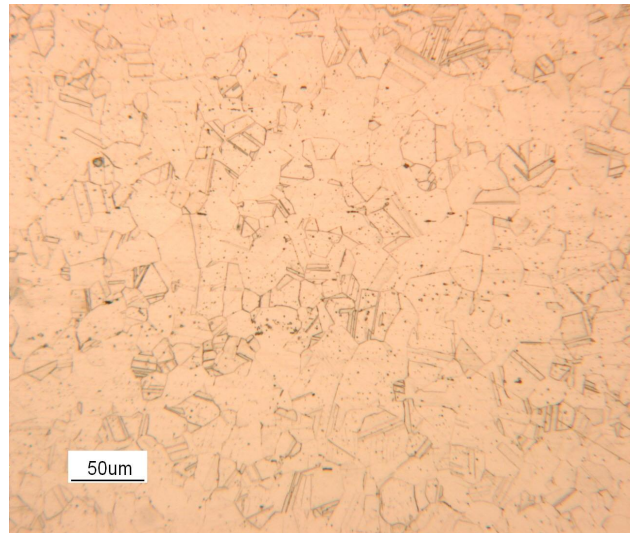
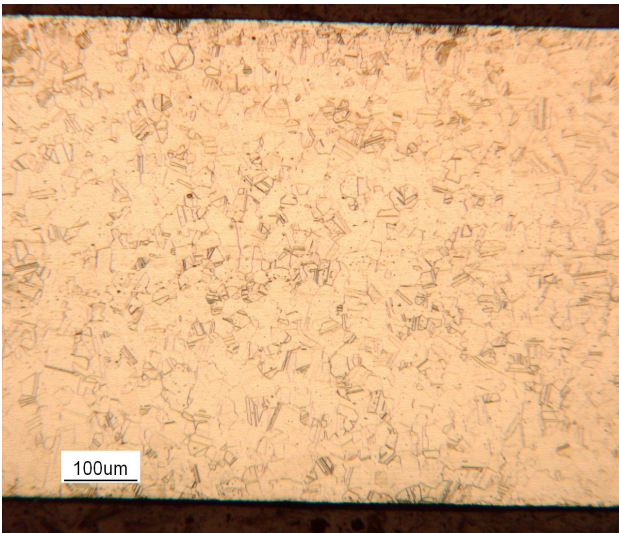
*Fig. 5.33 – Micrografia trasversale del campione a 225°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



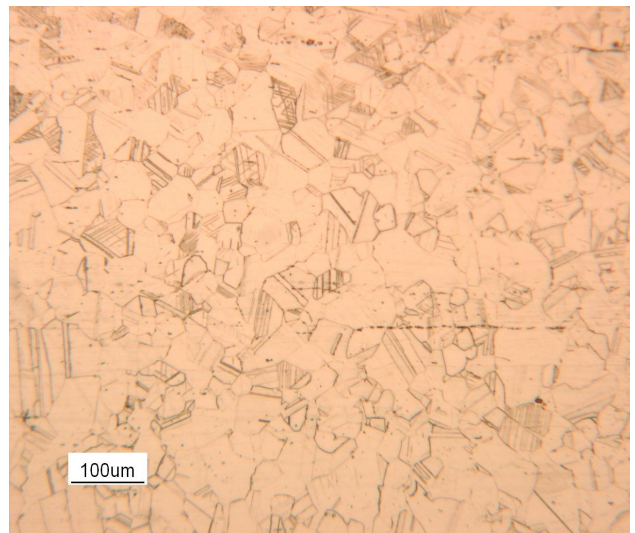
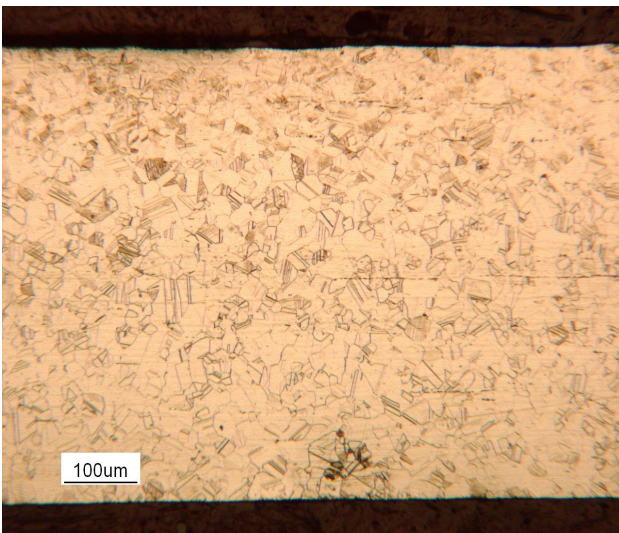
*Fig. 5.34 – Micrografia longitudinale del campione a 300°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



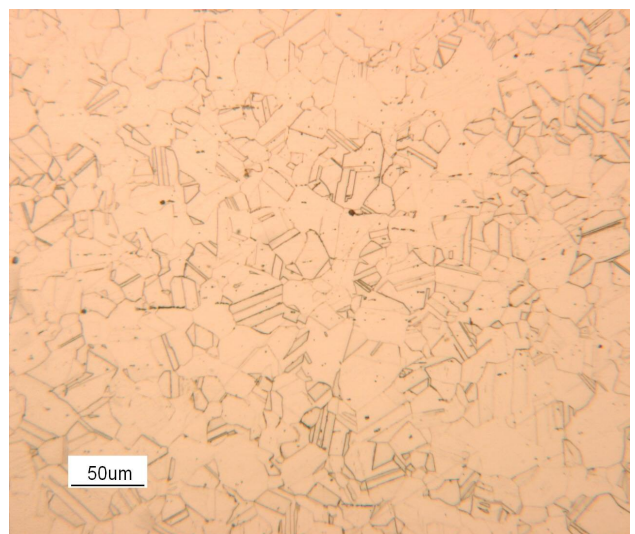
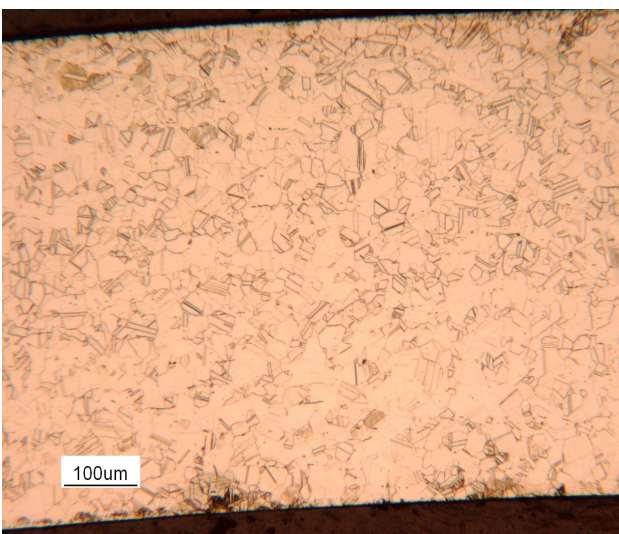
*Fig. 5.35 – Micrografia trasversale del campione a 300°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



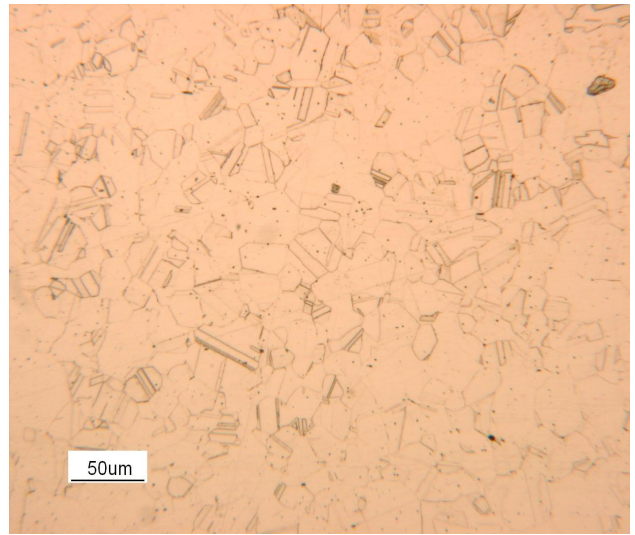
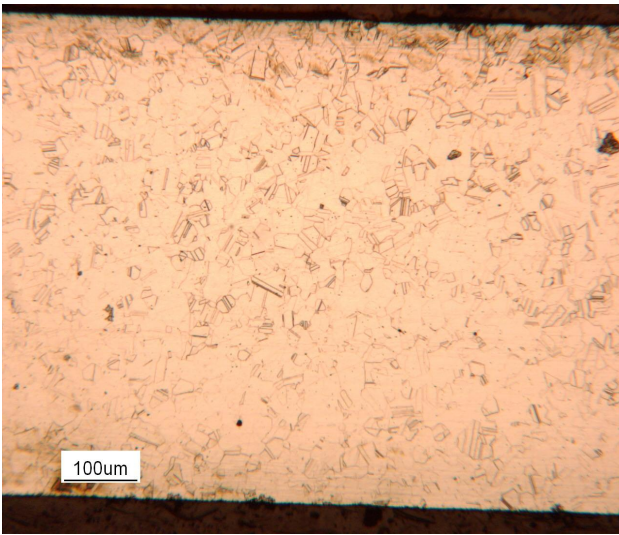
*Fig. 5.36 – Micrografia longitudinale del campione a 340°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



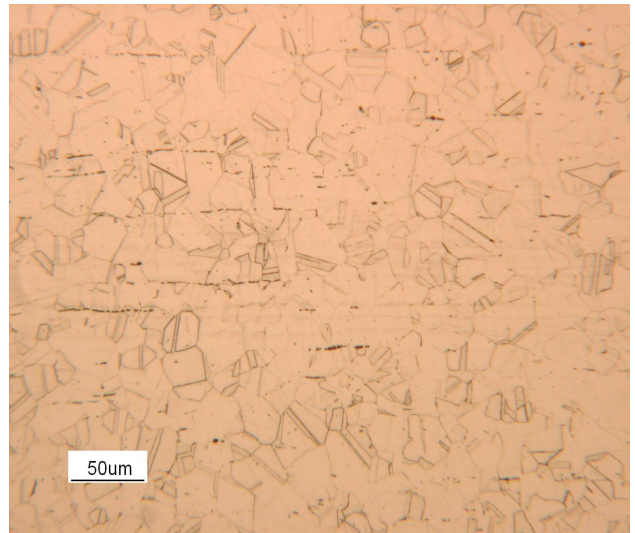
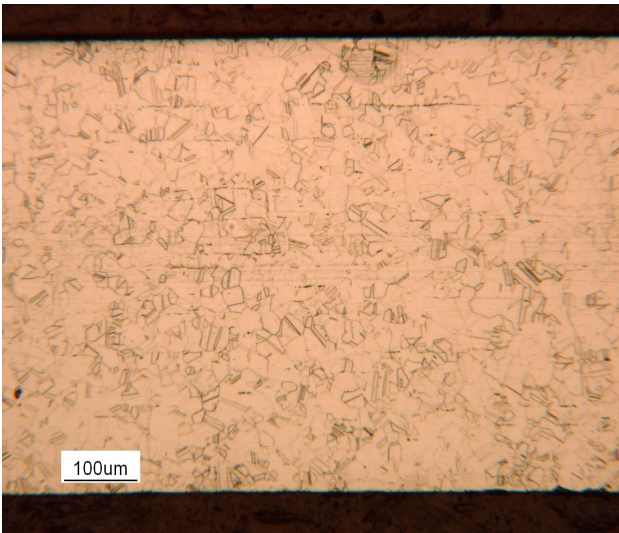
*Fig. 5.37 – Micrografia trasversale del campione a 340°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



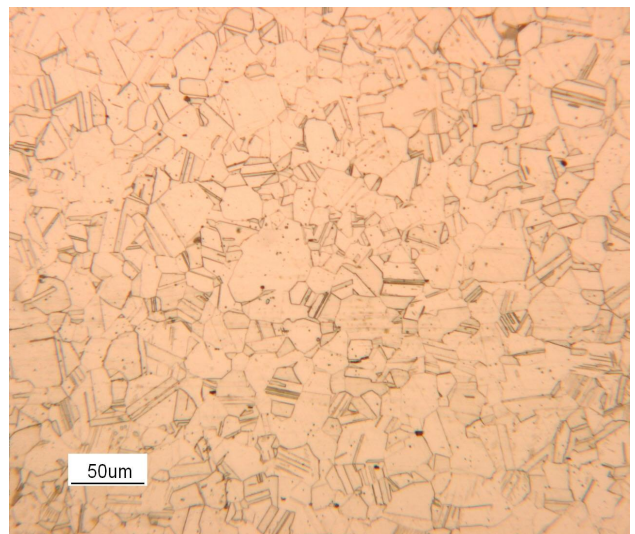
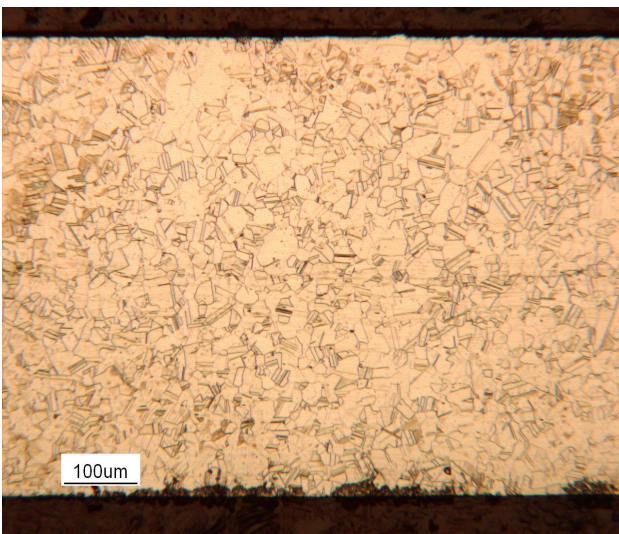
*Fig. 5.38 – Micrografia longitudinale del campione a 375°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



*Fig. 5.39 – Micrografia trasversale del campione a 375°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*

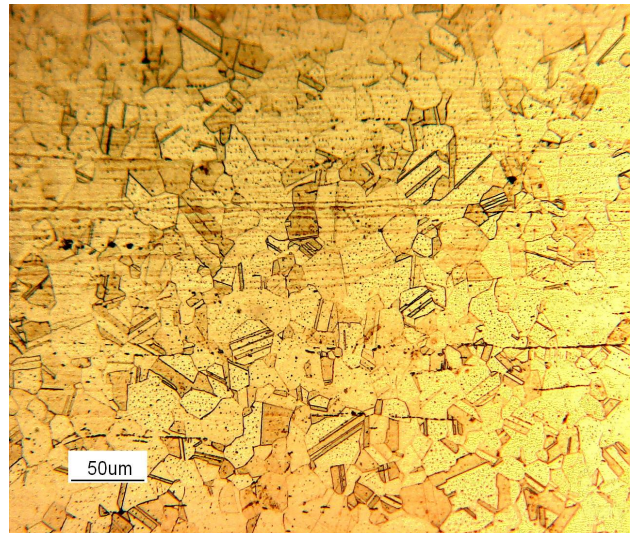
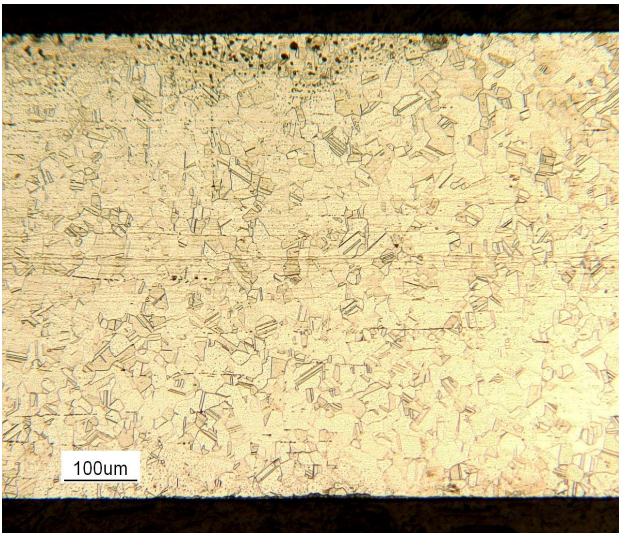


*Fig. 5.40 – Micrografia longitudinale del campione a 415°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*

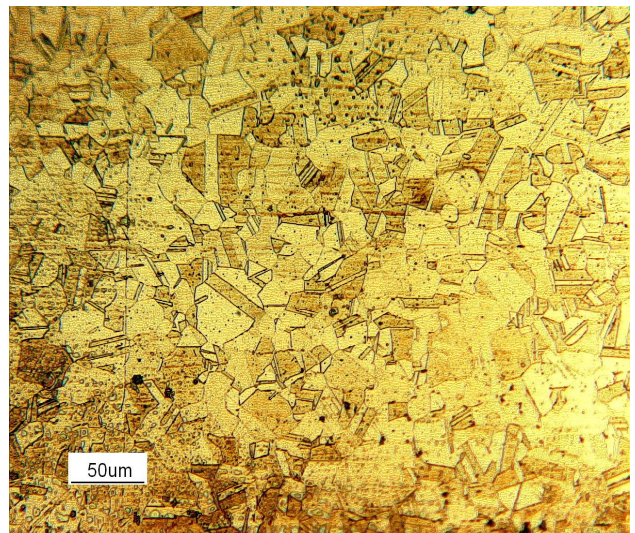
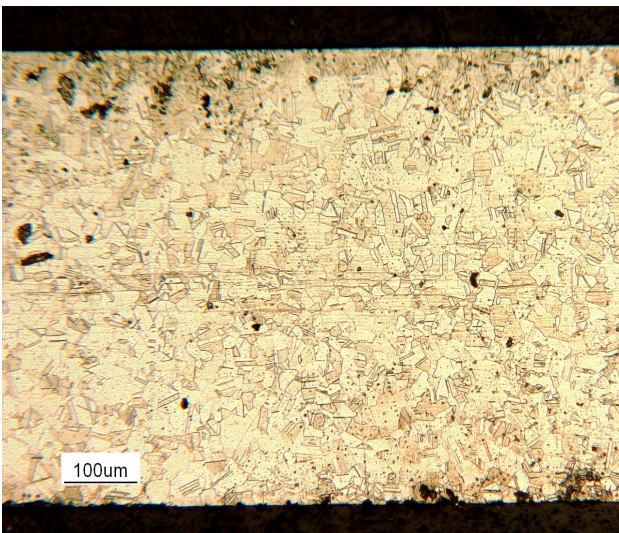


*Fig. 5.41 – Micrografia trasversale del campione a 415°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*

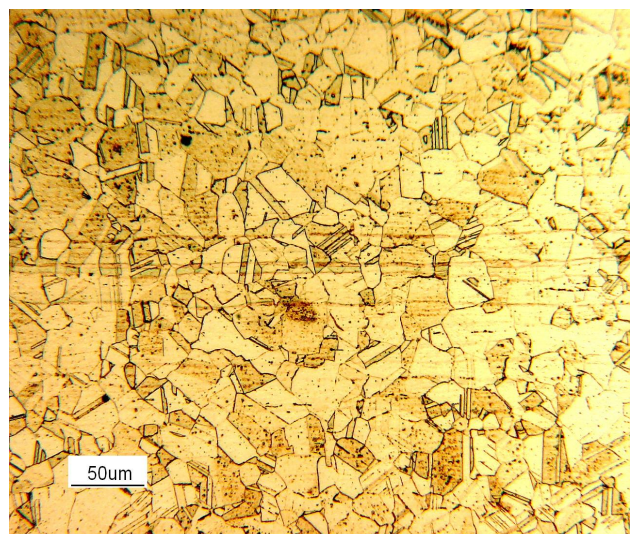
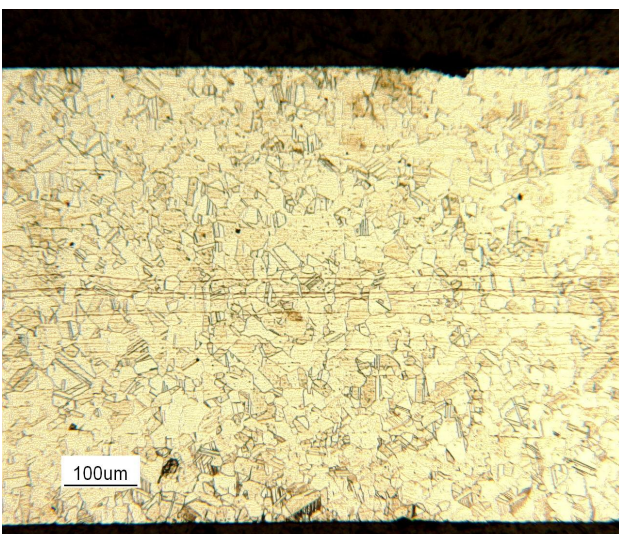




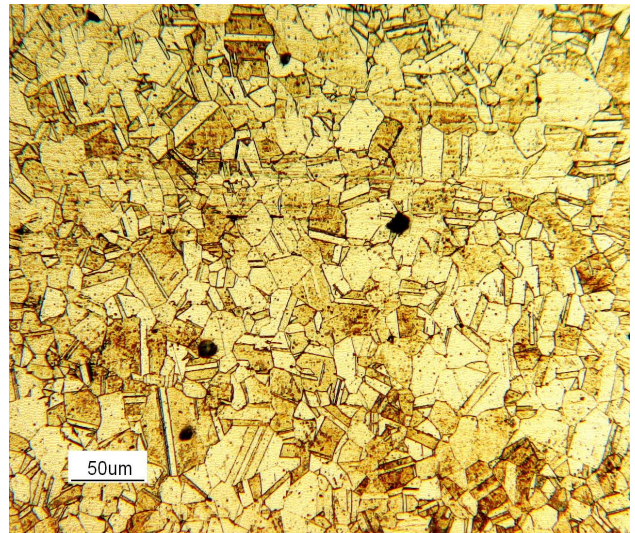
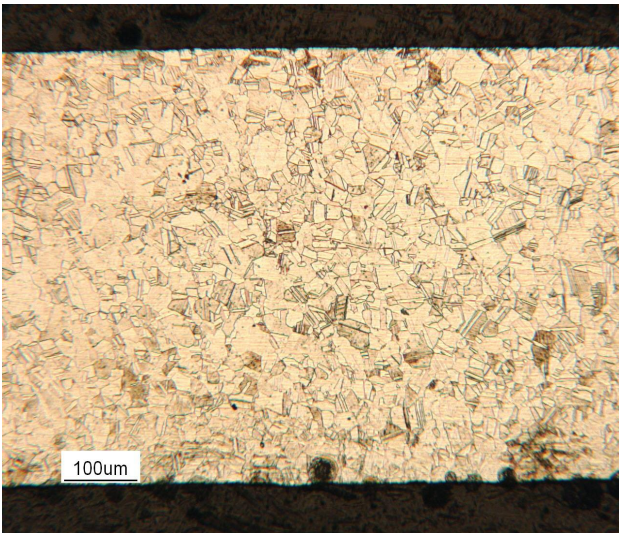
*Fig. 5.42 – Micrografia longitudinale del campione a 450°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



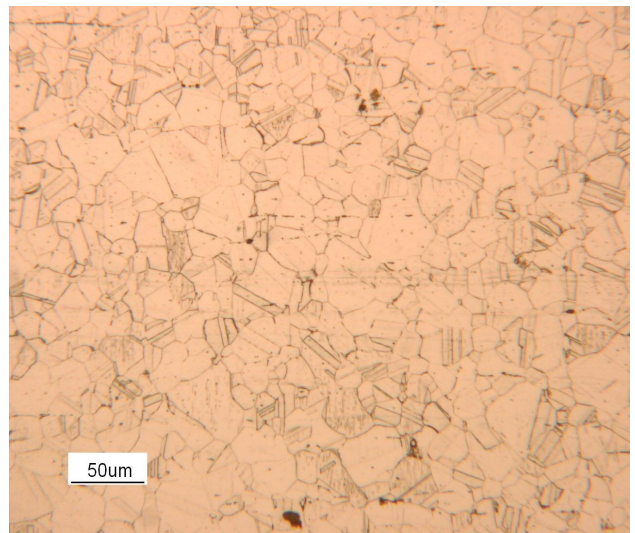
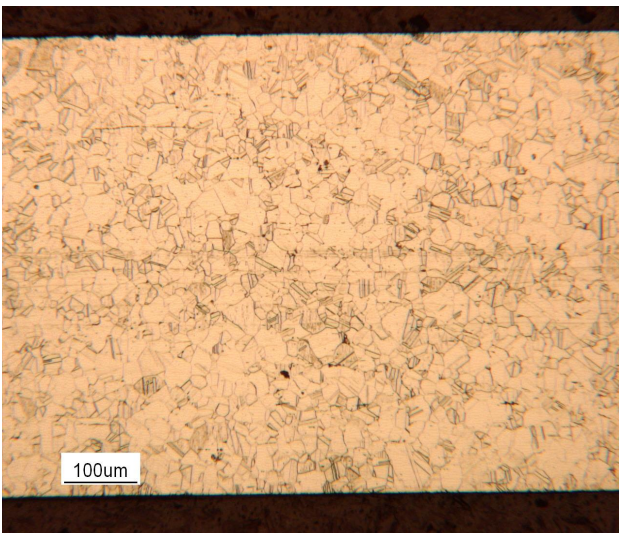
*Fig. 5.43 – Micrografia trasversale del campione a 450°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



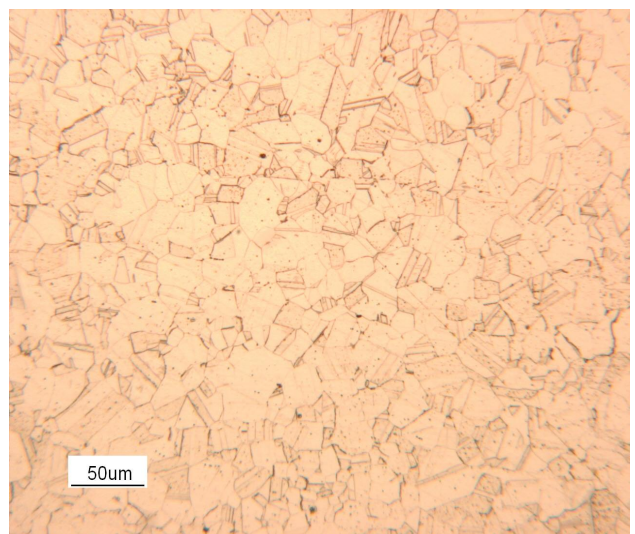
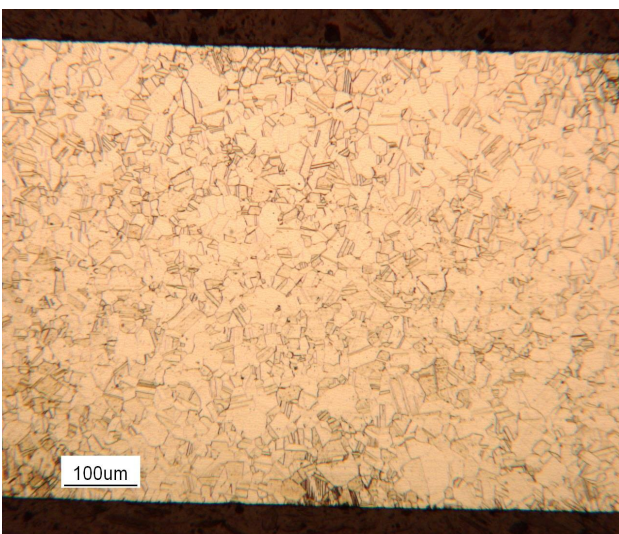
*Fig. 5.44 – Micrografia longitudinale del campione a 525°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



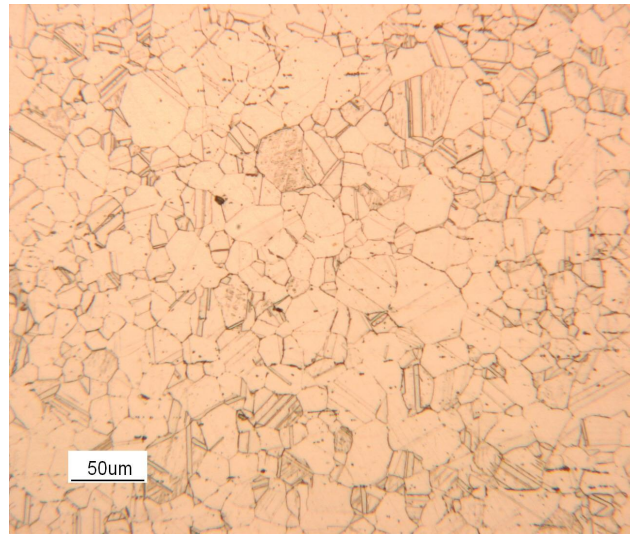
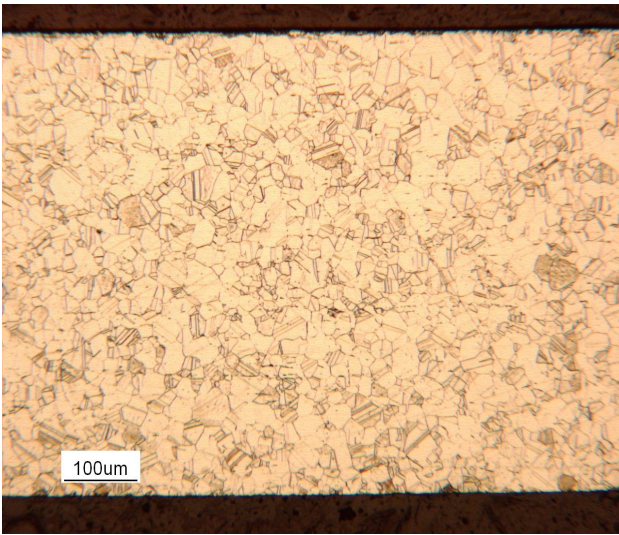
*Fig. 5.45 – Micrografia trasversale del campione a 525°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



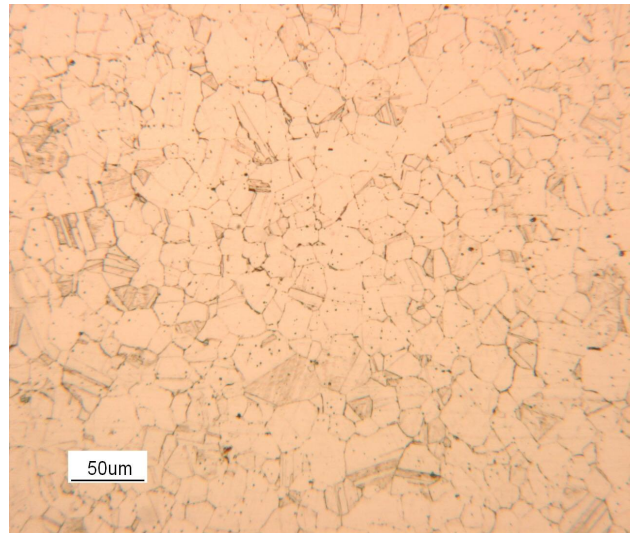
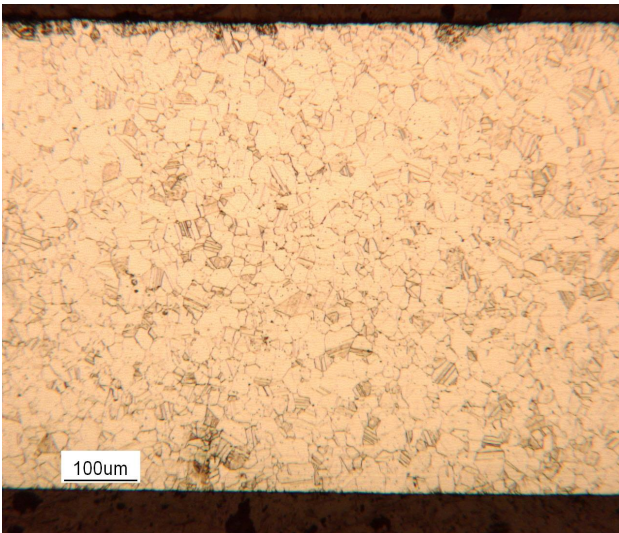
*Fig. 5.46 – Micrografia longitudinale del campione a 600°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



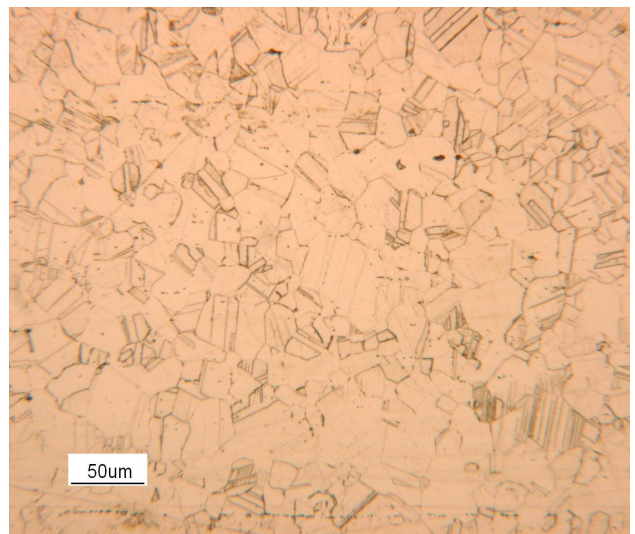
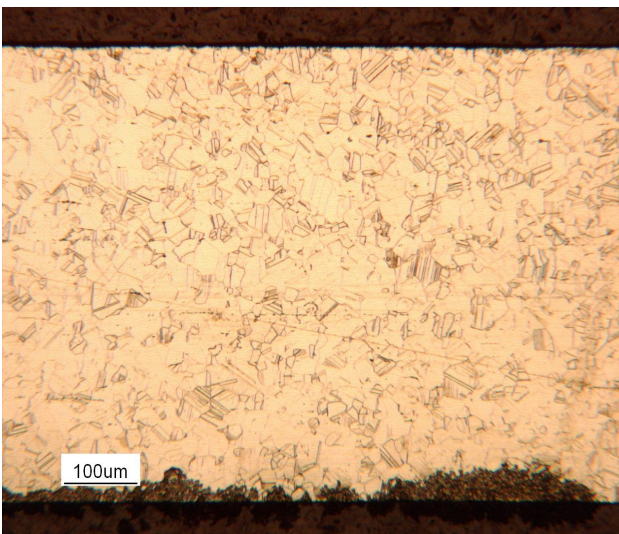
*Fig. 5.47 – Micrografia trasversale del campione a 600°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



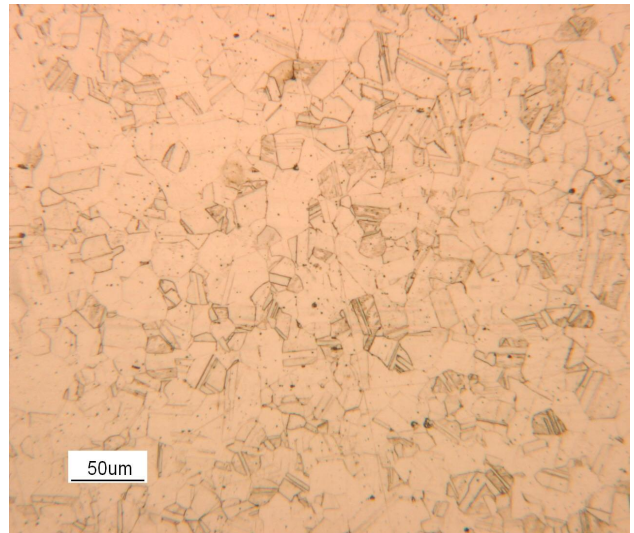
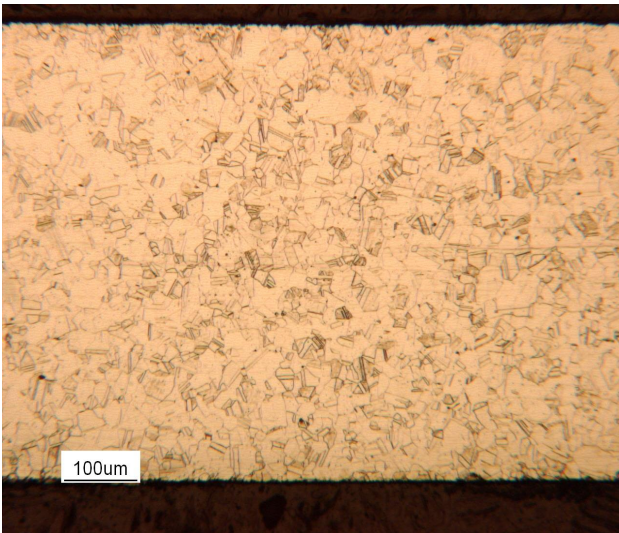
*Fig. 5.48 – Micrografia longitudinale del campione a 750°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



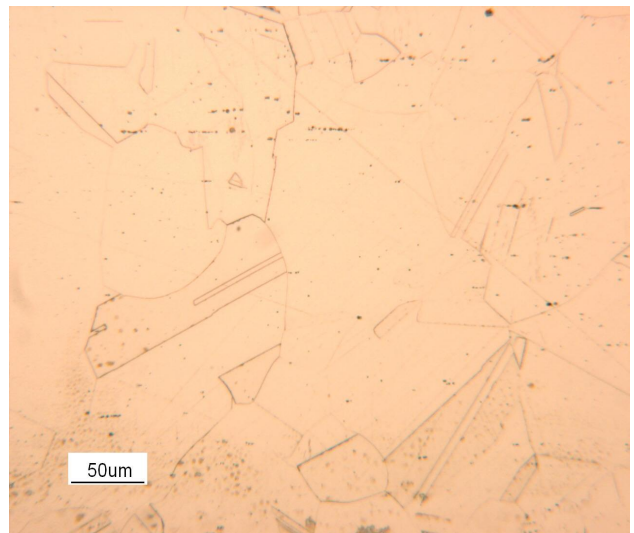
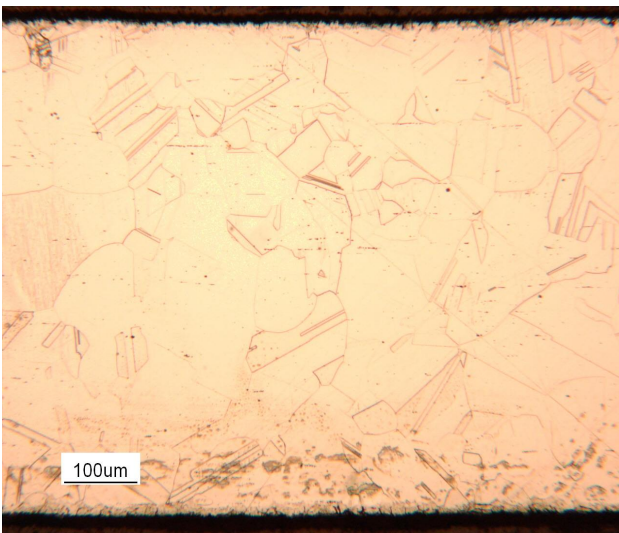
*Fig. 5.49 – Micrografia trasversale del campione a 750°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



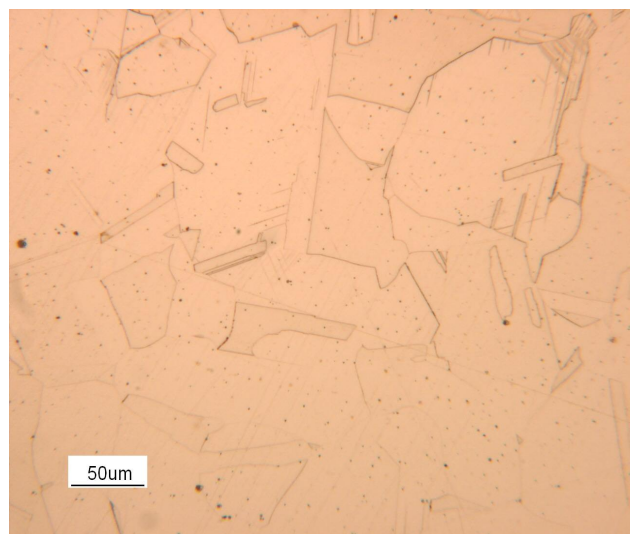
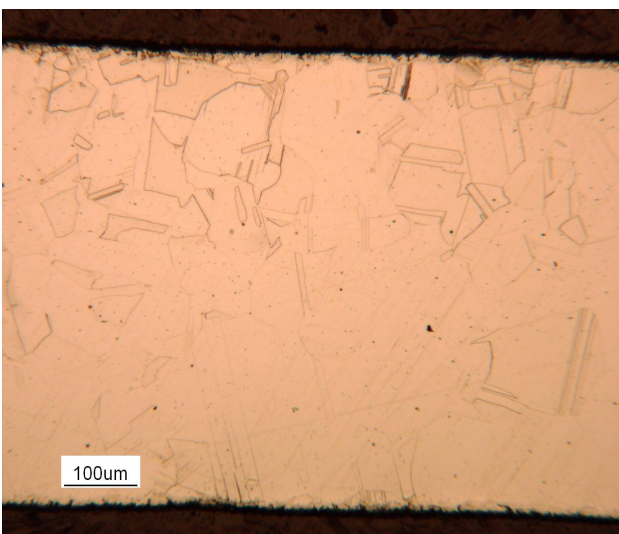
*Fig. 5.50 – Micrografia longitudinale del campione a 900°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



*Fig. 5.51 – Micrografia trasversale del campione a 900°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



*Fig. 5.52 – Micrografia longitudinale del campione a 1050°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*



*Fig. 5.53 – Micrografia trasversale del campione a 1050°C per 6 ore. a) 100x e b) 200x.*

Dal confronto tra i campioni scaldati un ora e 6 ore non si evidenziano significative differenze

a livello di struttura cristallina. Inoltre non si verifica la precipitazione di carburi a bordo di grano; ciò probabilmente è dovuto al fatto che l'acciaio preso in considerazione per le analisi si tratta di un acciaio AISI 316L con un contenuto di carbonio estremamente basso.

Di seguito viene riportata la tabella di riferimento della norma ASTM A240/A240M in cui vengono indicati i limiti inferiori e superiori degli elementi che caratterizzano la lega:

	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% N
min	-	-	-	-	-	16,0	2,00	10,0	-
max	0,03	2,0	0,75	0,045	0,03	18,0	3,00	14,0	0,10

Tabella 5.1 – Riferimenti massimi e minimi degli elementi chimici per un acciaio AISI 316L.

Le analisi chimiche dei campioni sono state effettuate attraverso un quantometro ad emissione ottica. Nella seguente tabella vengono riportate le analisi chimiche dei campioni:

N°	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
001	0,02	0,36	1,37	0,03	0,005	16,89	10,10	2,01
002	0,02	0,35	1,40	0,03	0,000	16,92	10,69	2,17
003	0,02	0,36	1,37	0,03	0,005	16,82	10,09	2,03
004	0,02	0,35	1,39	0,03	0,000	16,84	10,65	2,19

N°	Al	Cu	Co	Ti	Nb	V	W	Pb
001	0	0,31	0,13	0,01	<0,001	0,06	0,04	<0,0002
002	0	0,29	0,08	0,01	<0,001	0,06	0,02	<0,0002
003	0	0,31	0,13	0,01	<0,001	0,06	0,04	<0,0002
004	0	0,29	0,08	0,01	<0,001	0,07	0,02	<0,0002

N°	B	Sb	Sn	As	Bi	Ta	N	Fe
001	0,0002	0	0,012	0,01	0	<0,0005	0,03	68,57
002	0,0010	0	0,015	0,01	0	<0,0005	0,06	67,83
003	0,0002	0	0,012	0,01	0	<0,0005	0,04	68,63
004	0,0009	0	0,017	0,01	0	<0,0005	0,07	67,93

Tabella 5.2 – Composizione chimica dei campioni.

Come si può notare le lamiere provengono da due colate differenti: i campioni 001 e 003 provengono dalla stessa colata, mentre i due campioni 002 e 004 hanno una composizione chimica simile dovuta alla medesima colata.

## 5.2 – Analisi ossidi superficiali

L'analisi degli ossidi superficiali è stata effettuata mediante l'uso di un microscopio a

scansione elettronica (SEM) ed ha previsto l'analisi chimica (EDS) e l'analisi visiva. Come precedentemente fatto per l'analisi della struttura cristallina, anche per l'analisi degli ossidi si riportano le eventuali differenze del film di ossido rispetto alla temperatura ambiente (caso preso come riferimento).

I risultati dell'analisi visiva vengono riportati di seguito:

**20°C – 1 ora:** l'ossido di cromo si presenta compatto e ben adeso alla superficie. Morfologia tipica degli acciai inossidabili;

**20°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**150°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**150°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**225°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**225°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**300°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**300°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**340°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**340°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**375°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**375°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**415°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**415°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**450°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**450°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**525°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**525°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**600°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

**600°C – 6 ore:** cambia la morfologia dell'ossido di cromo: l'ossido inizia a rigenerarsi formando dei nuovi “batuffoli” di ossido. L'ossido risulta più fragile e comincia a staccarsi dalla superficie;

**750°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C – 1 ora;

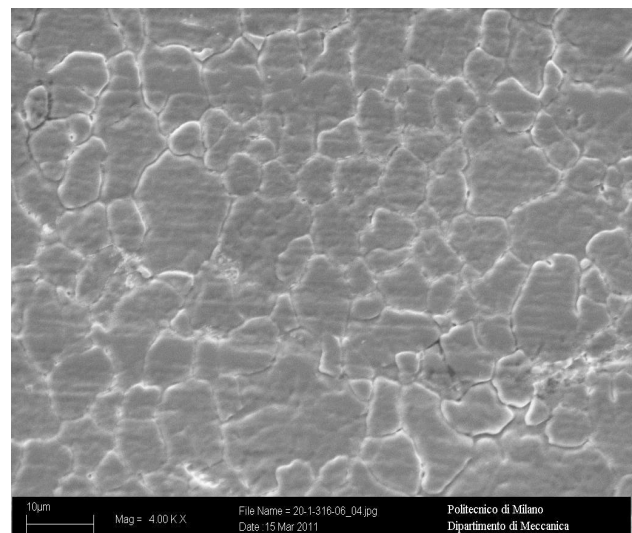
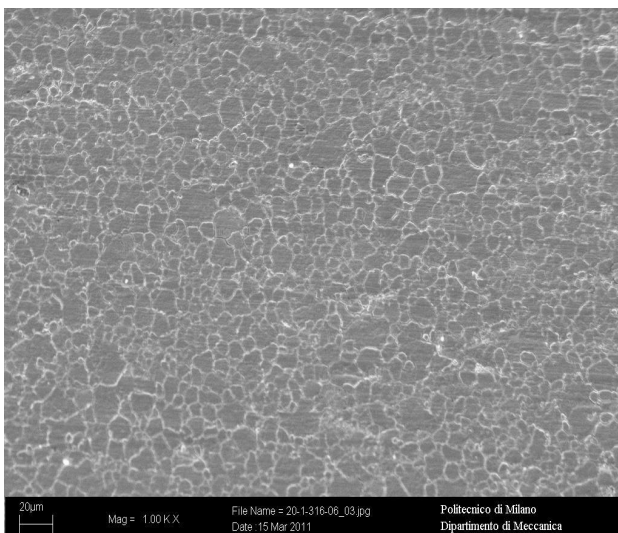
**750°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 600°C – 6 ore;

**900°C – 1 ora:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 600°C – 6 ore;

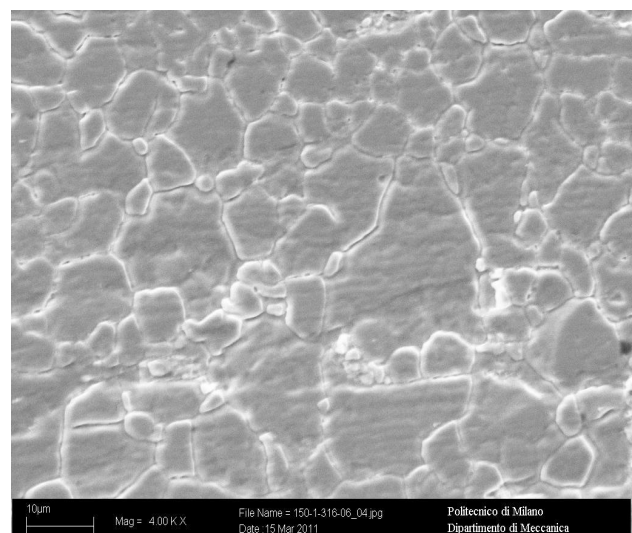
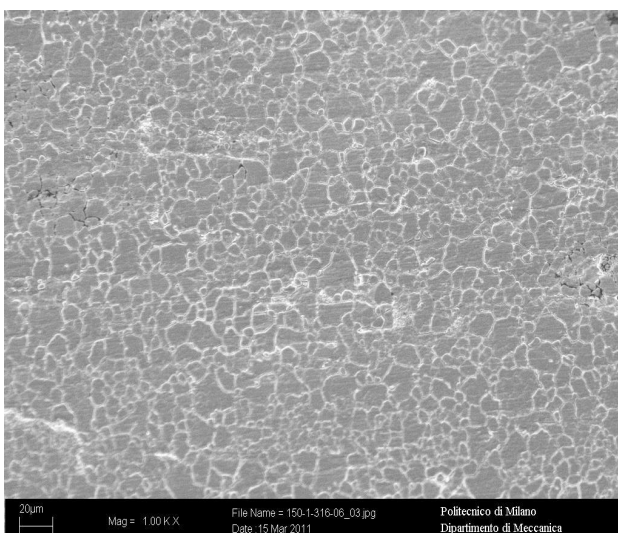
**900°C – 6 ore:** la rigenerazione dell'ossido aumenta in maniera considerevole e si fa fatica a vedere la superficie sottostante. L'ossido di cromo ora è fragile e si stacca dalla superficie in quantità macroscopica;

**1050°C – 1 ora:** accrescimento dei “batuffoli” dell'ossido. A livello macroscopico si staccano delle scaglie di ossido;

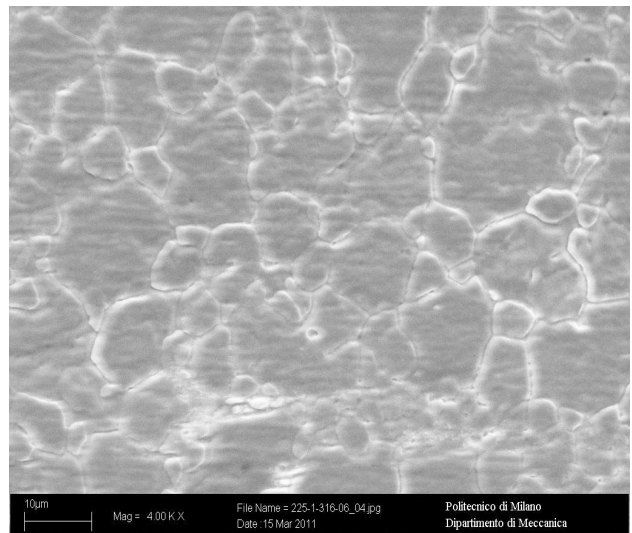
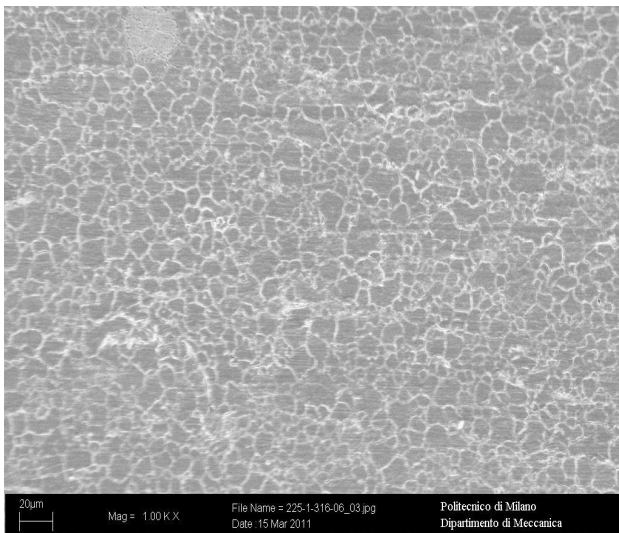
**1050°C – 6 ore:** non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 1050°C – 1 ora.



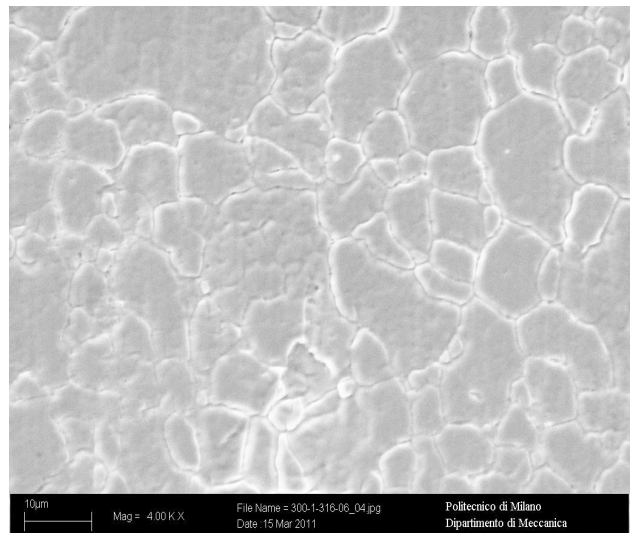
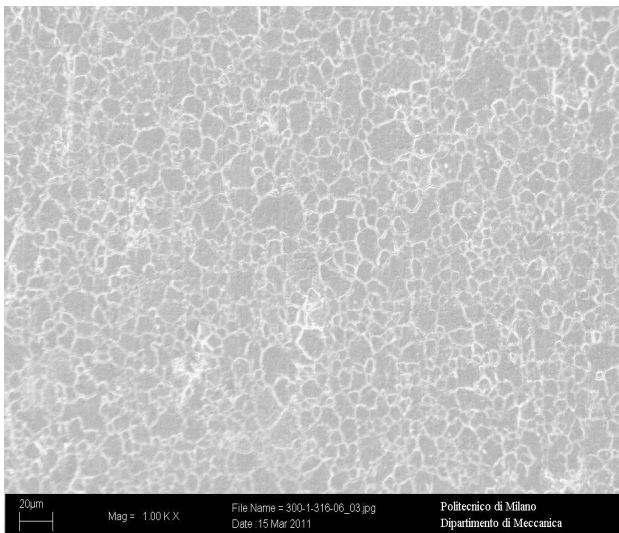
*Fig. 5.54 – Aspetto dell'ossido di cromo a 20°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



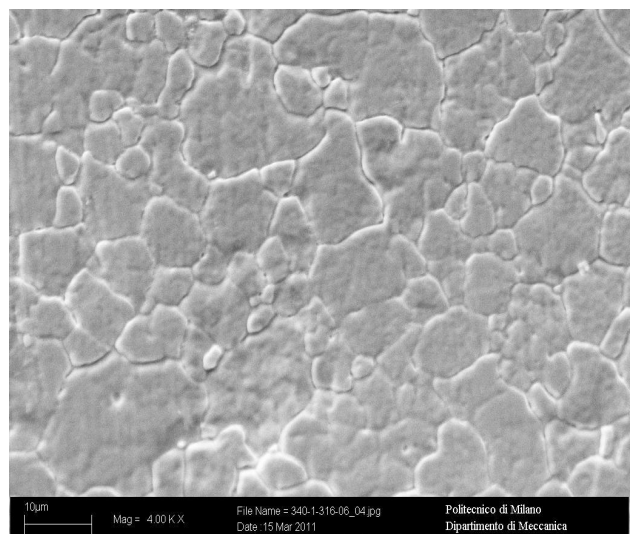
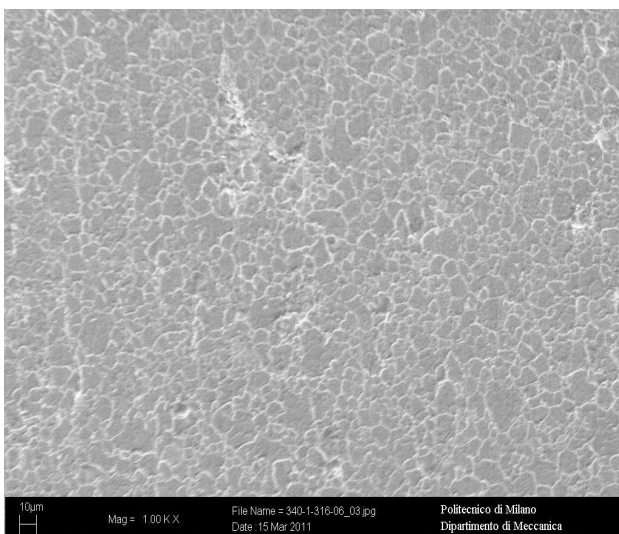
*Fig. 5.55 – Aspetto dell'ossido di cromo a 150°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



*Fig. 5.56 – Aspetto dell'ossido di cromo a 225°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*

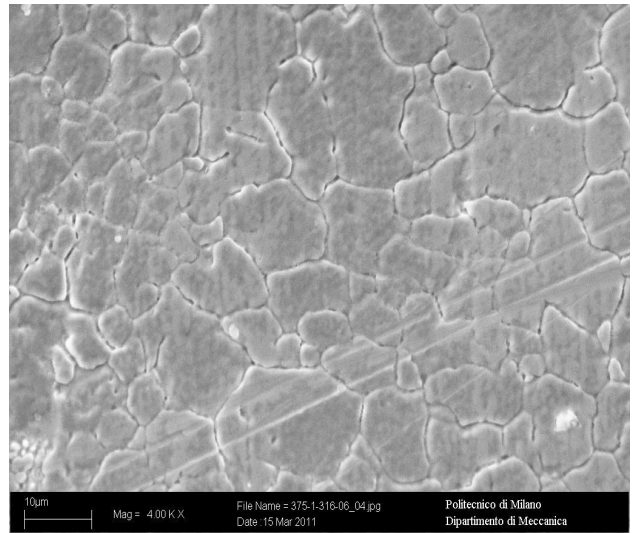
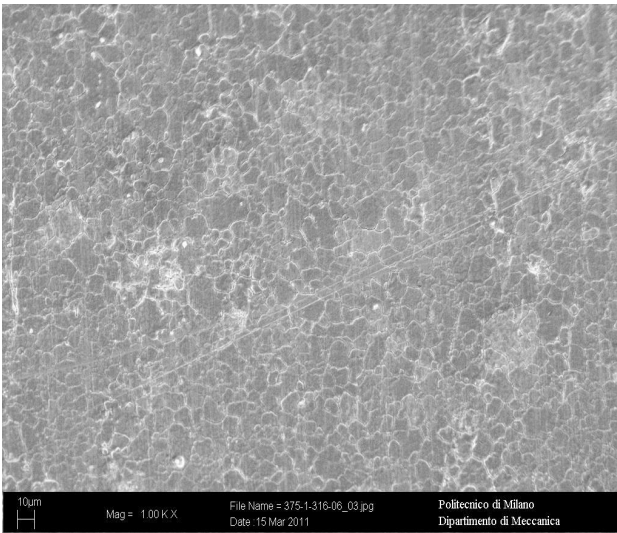


*Fig. 5.57 – Aspetto dell'ossido di cromo a 300°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*

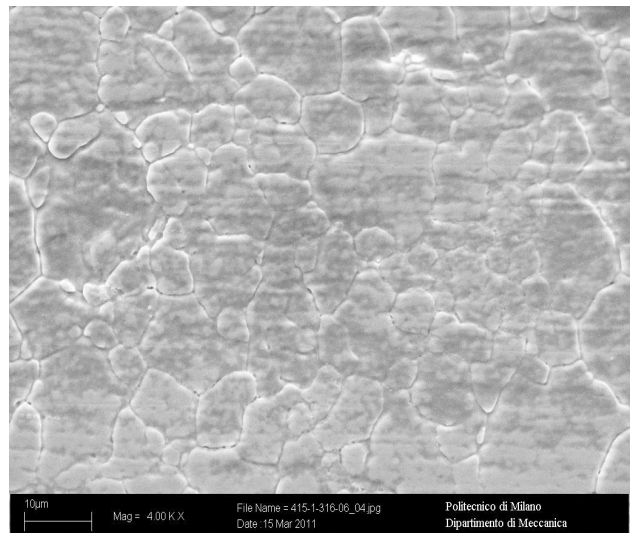
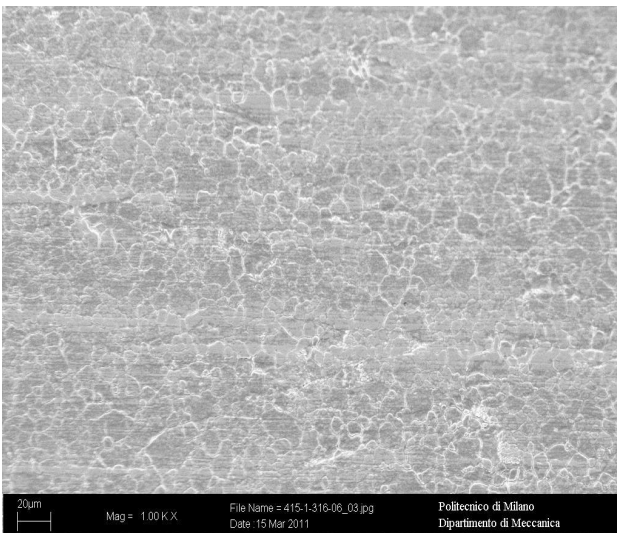


*Fig. 5.58 – Aspetto dell'ossido di cromo a 340°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*

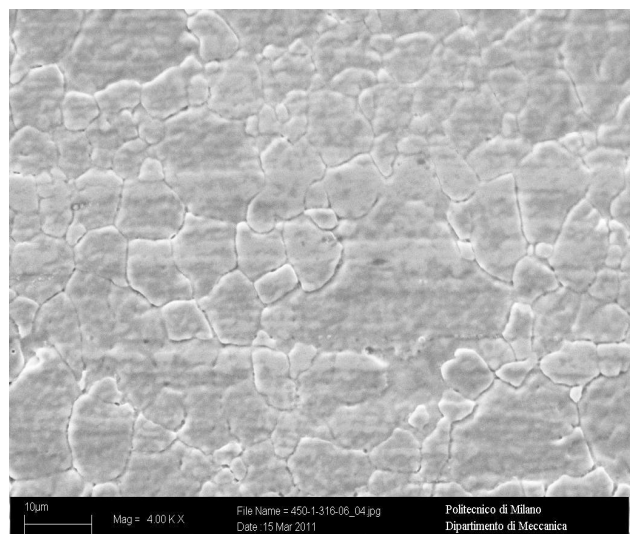
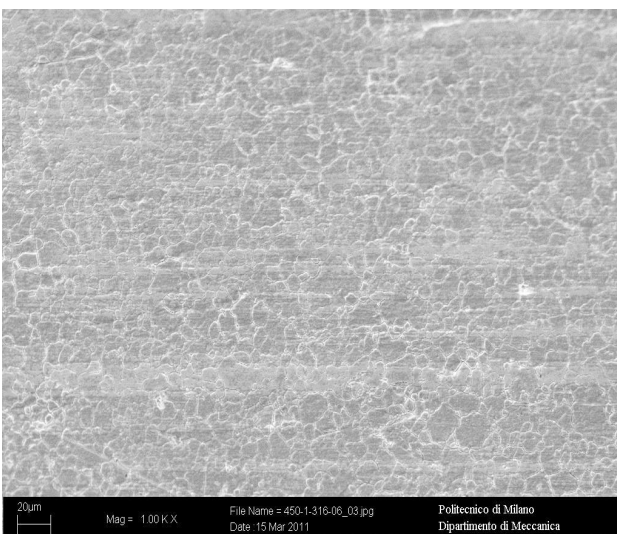




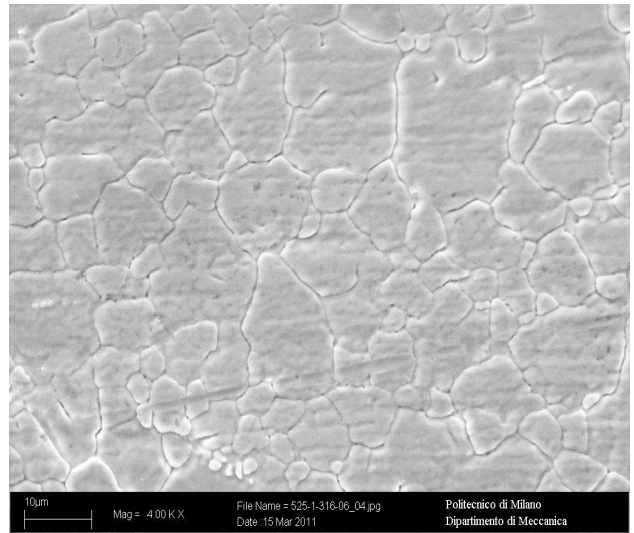
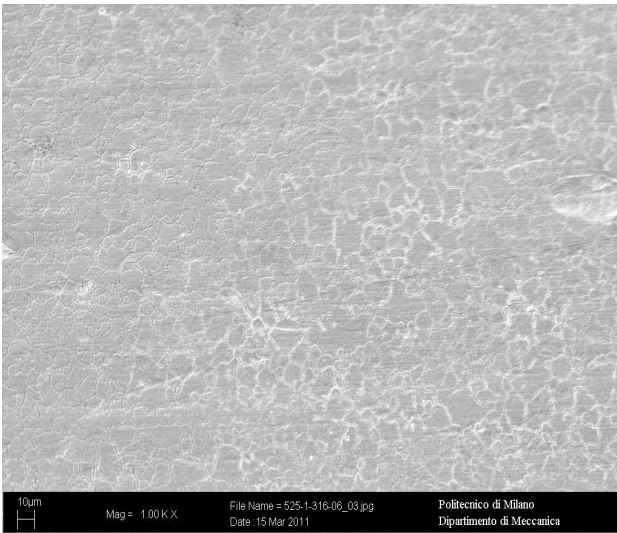
*Fig. 5.59 – Aspetto dell'ossido di cromo a 375°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



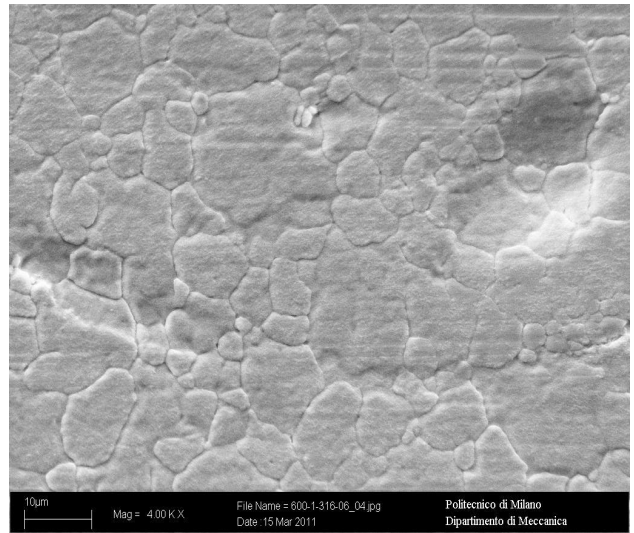
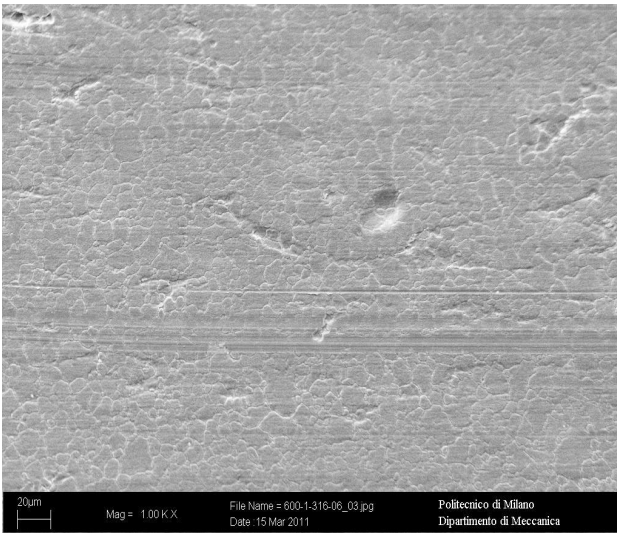
*Fig. 5.60 – Aspetto dell'ossido di cromo a 415°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



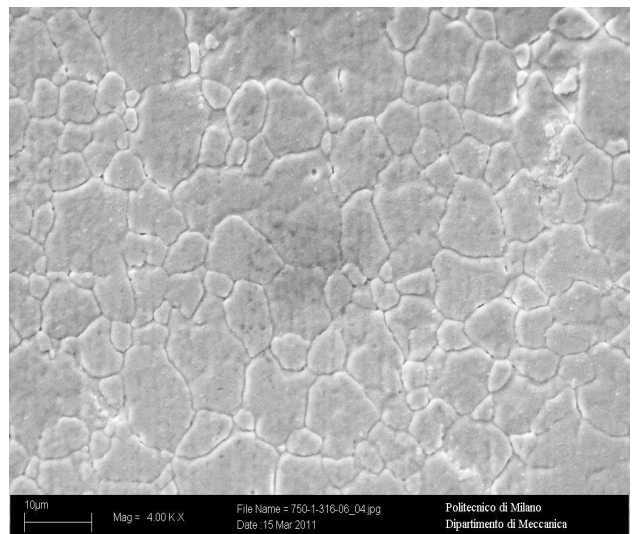
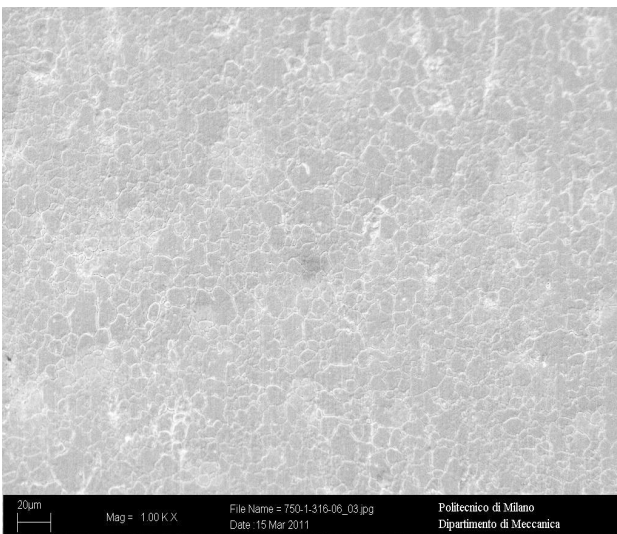
*Fig. 5.61 – Aspetto dell'ossido di cromo a 450°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



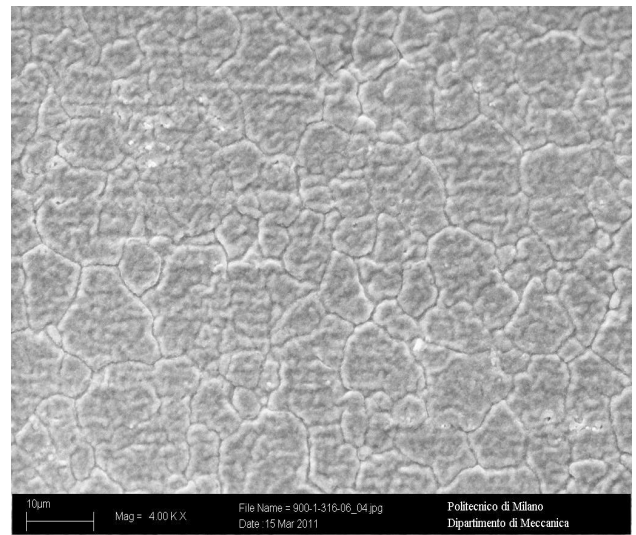
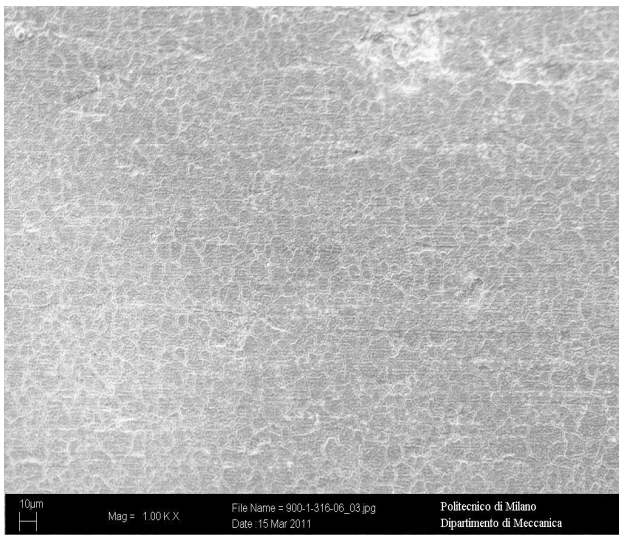
*Fig. 5.62 – Aspetto dell'ossido di cromo a 525°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



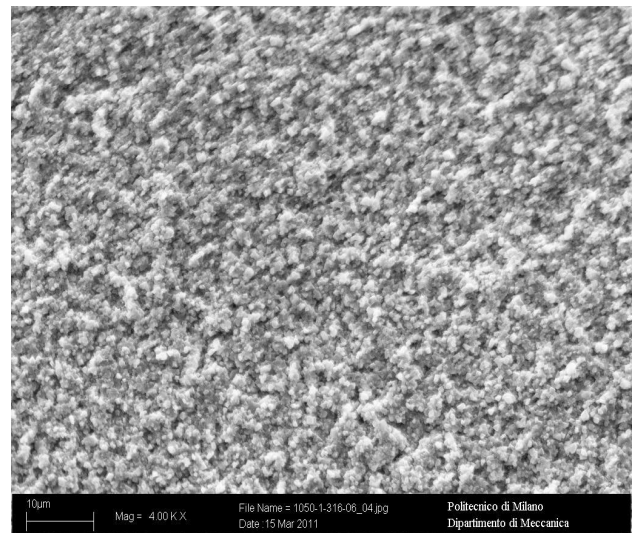
*Fig. 5.63 – Aspetto dell'ossido di cromo a 600°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



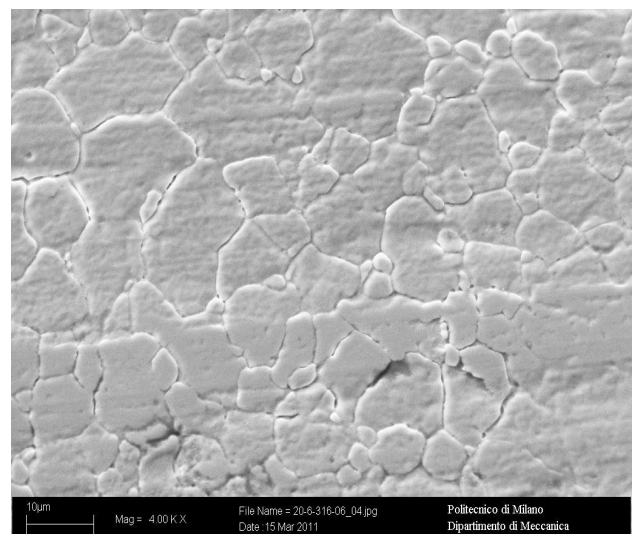
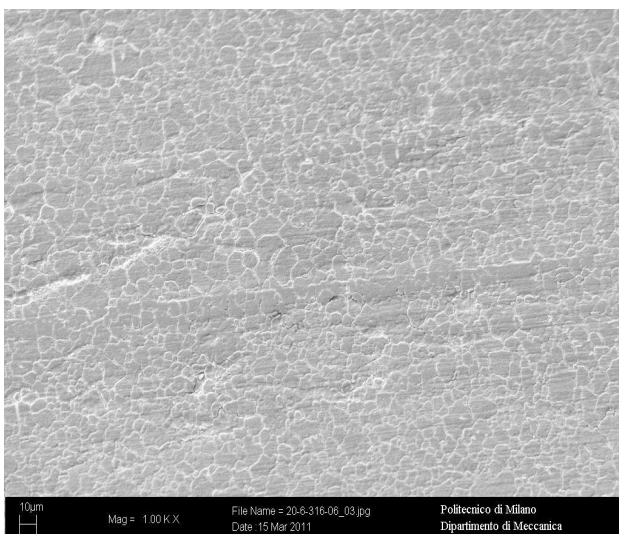
*Fig. 5.64 – Aspetto dell'ossido di cromo a 750°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



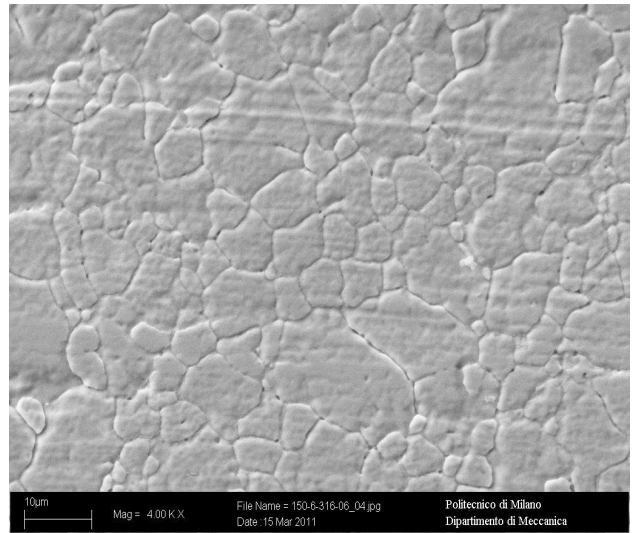
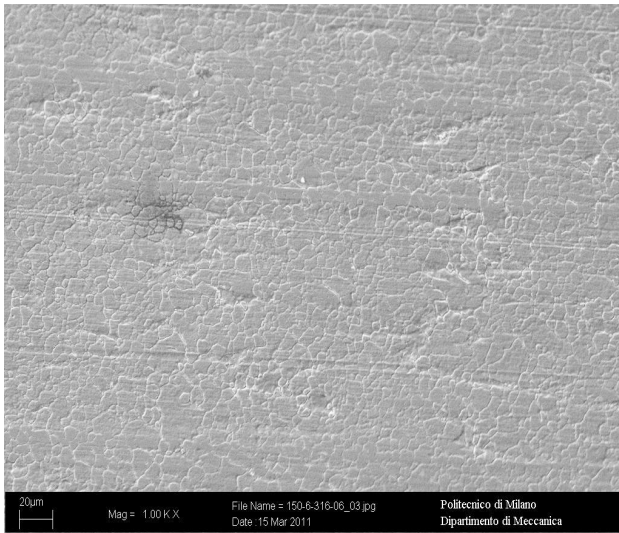
*Fig. 5.65 – Aspetto dell'ossido di cromo a 900°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



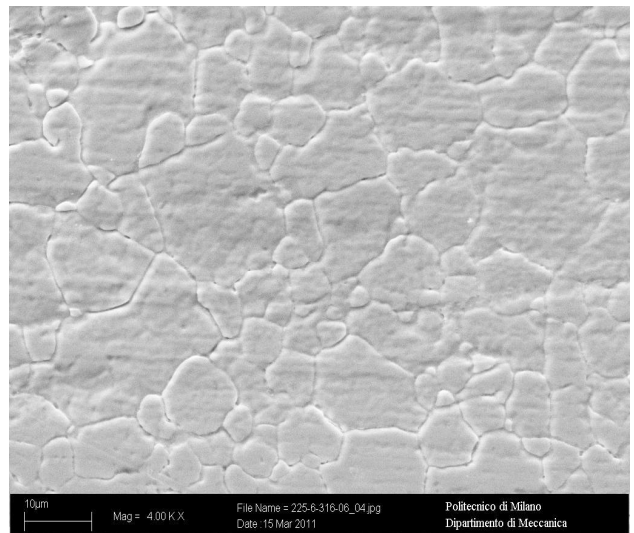
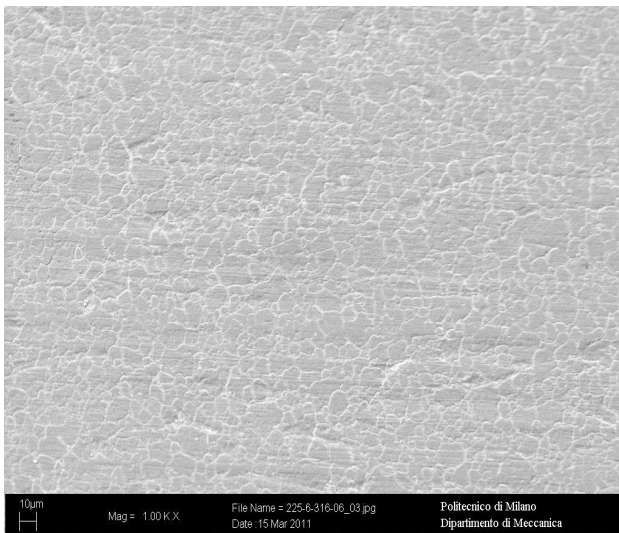
*Fig. 5.66 – Aspetto dell'ossido di cromo a 1050°C per 1 ora. a) 1000x e b) 4000x.*



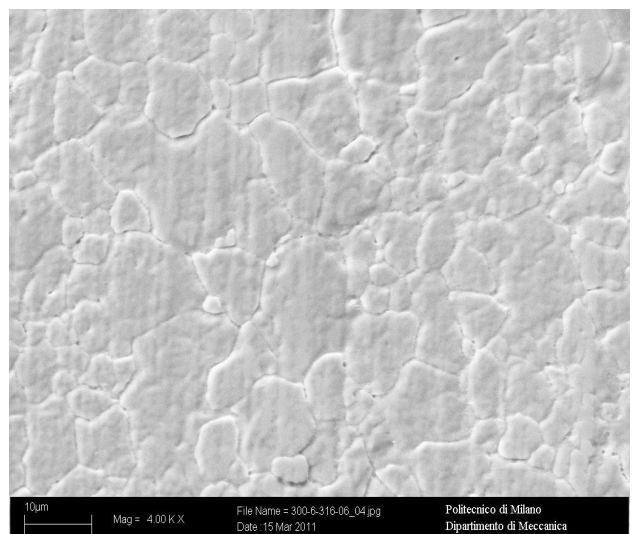
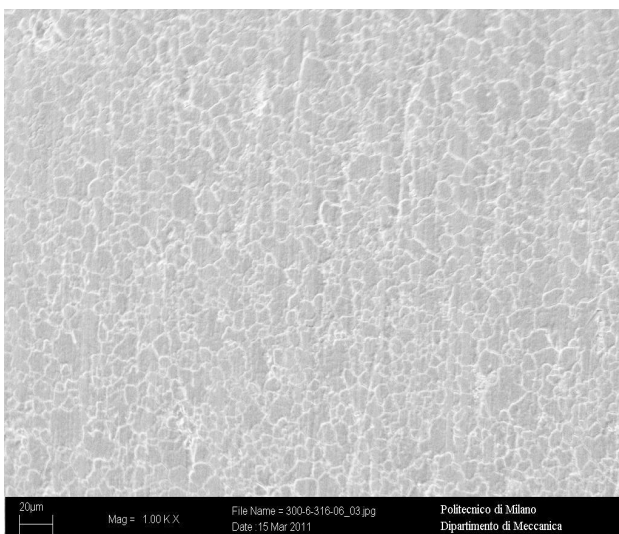
*Fig. 5.67 – Aspetto dell'ossido di cromo a 20°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



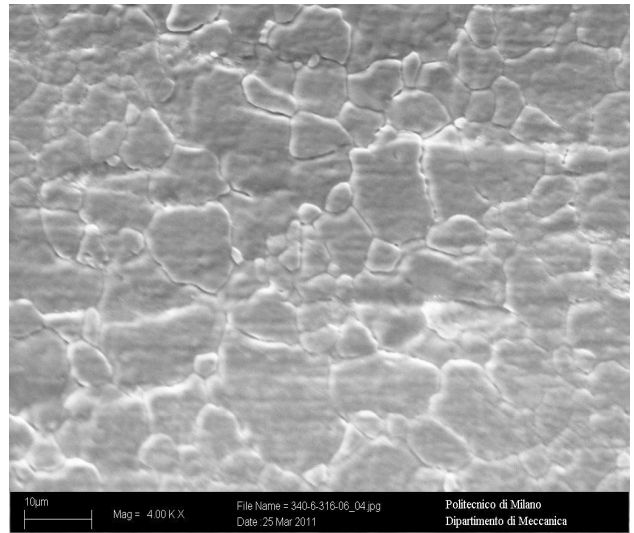
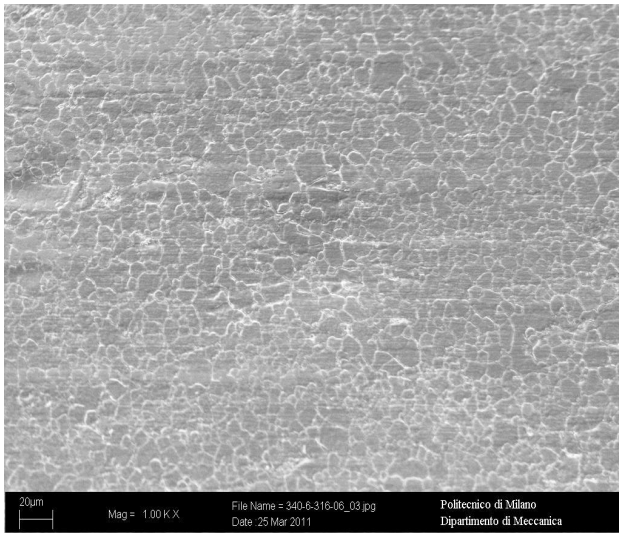
*Fig. 5.68 – Aspetto dell'ossido di cromo a 150°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



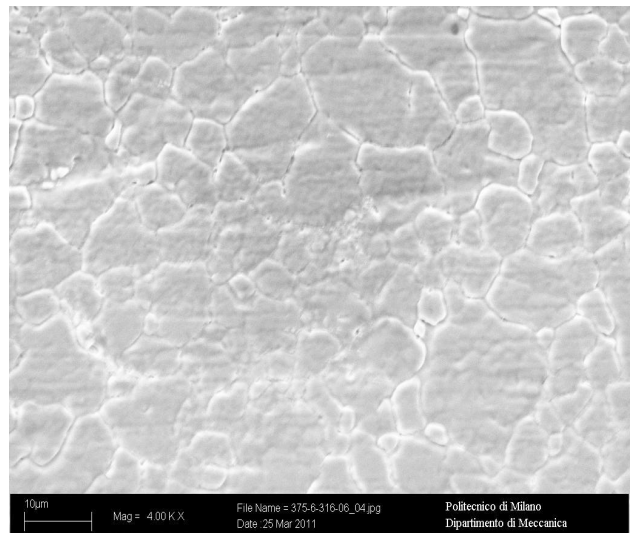
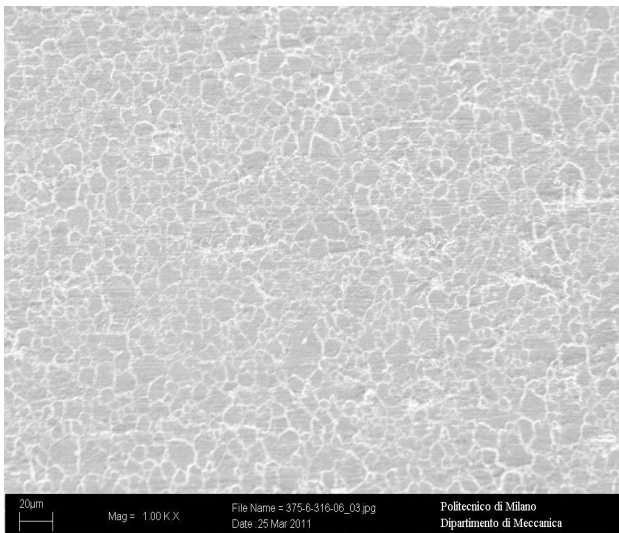
*Fig. 5.69 – Aspetto dell'ossido di cromo a 225°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



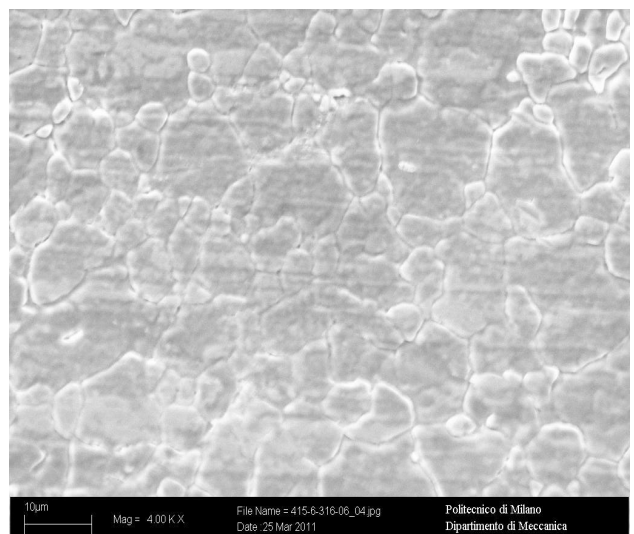
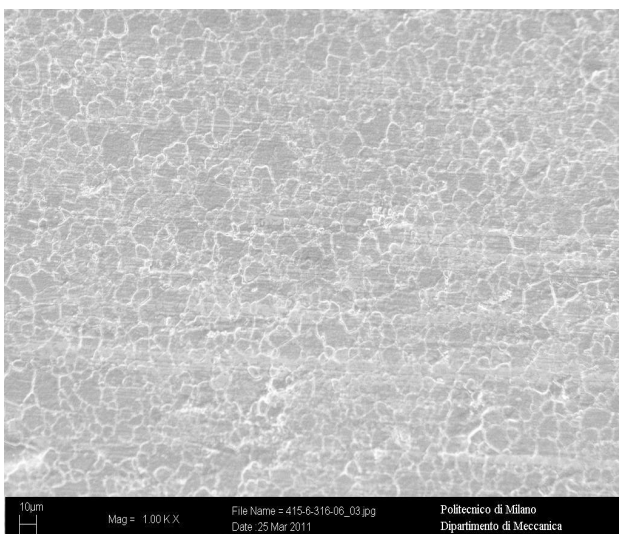
*Fig. 5.70 – Aspetto dell'ossido di cromo a 300°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



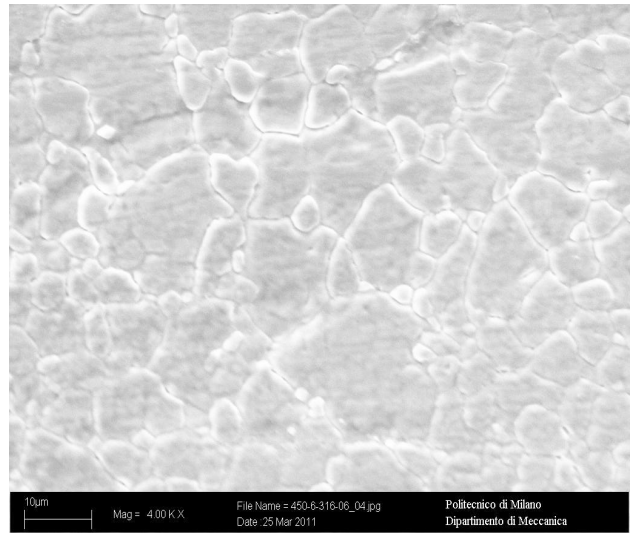
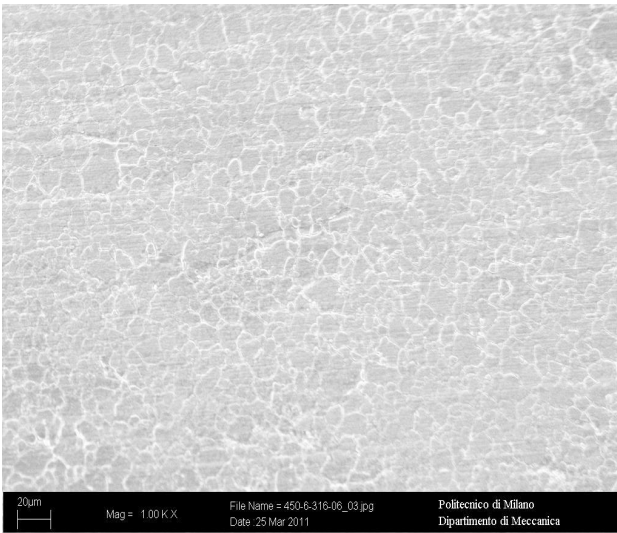
*Fig. 5.71 – Aspetto dell'ossido di cromo a 340°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



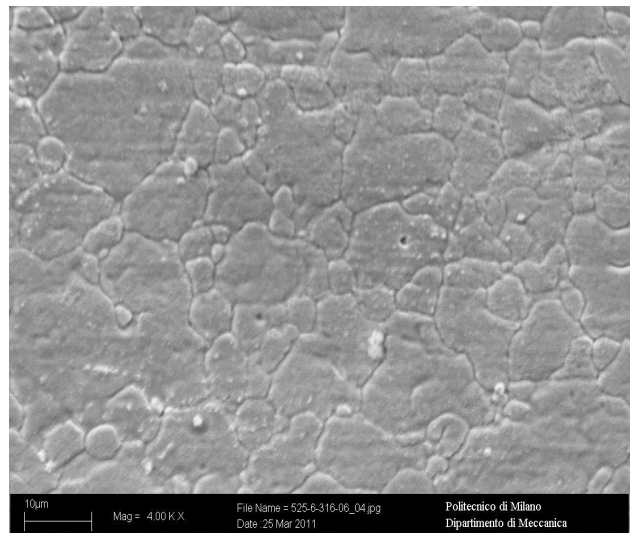
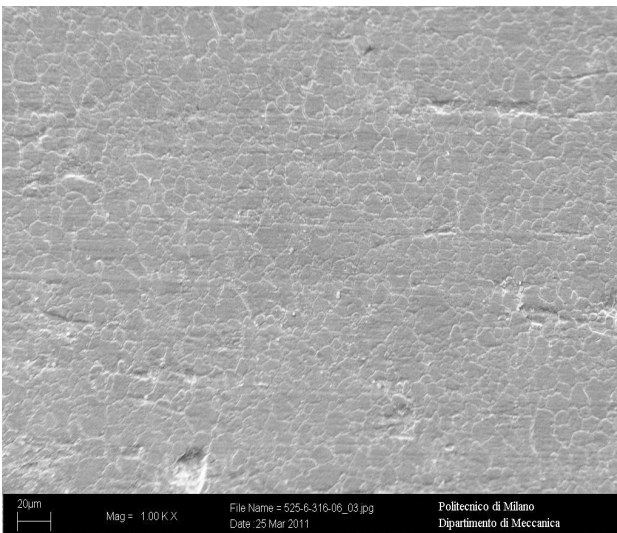
*Fig. 5.72 – Aspetto dell'ossido di cromo a 375°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



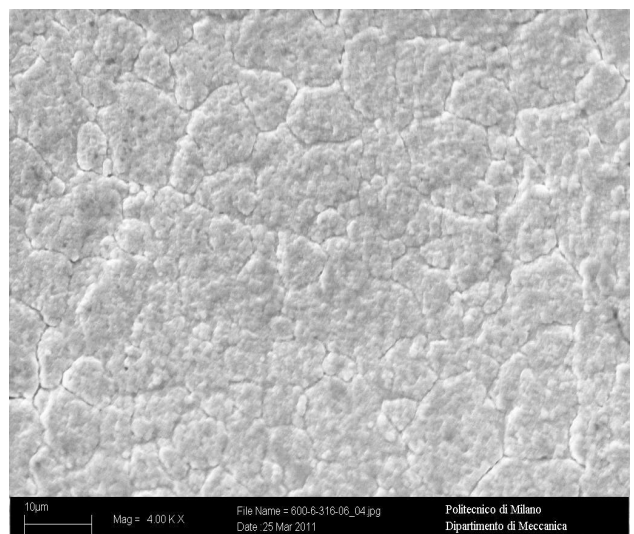
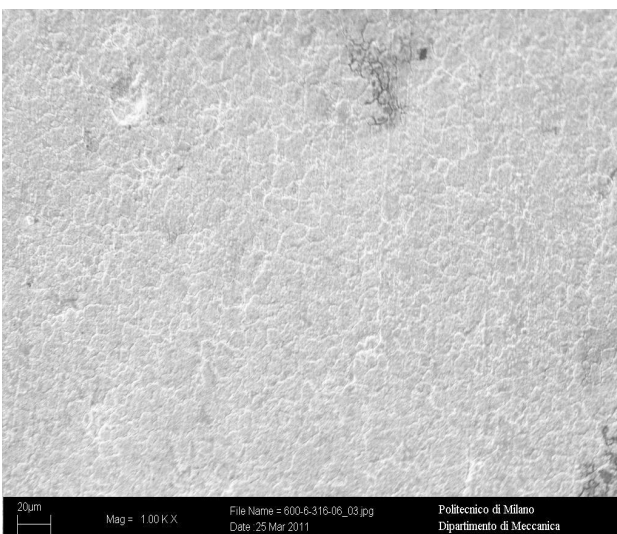
*Fig. 5.73 – Aspetto dell'ossido di cromo a 415°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



*Fig. 5.74 – Aspetto dell'ossido di cromo a 450°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



*Fig. 5.75 – Aspetto dell'ossido di cromo a 525°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*



*Fig. 5.76 – Aspetto dell'ossido di cromo a 600°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.*

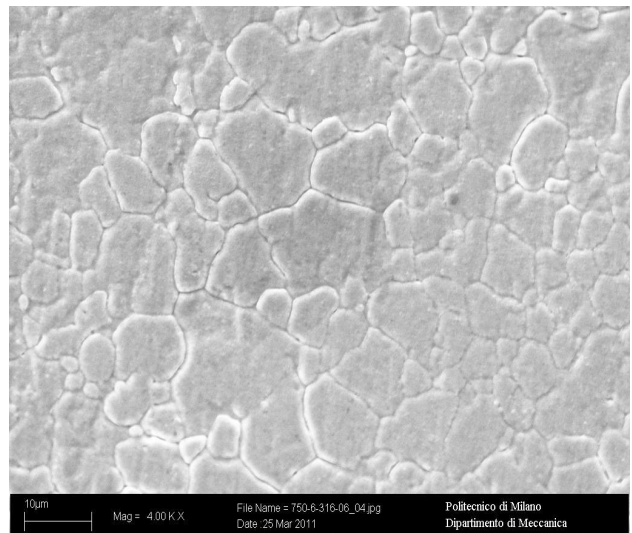
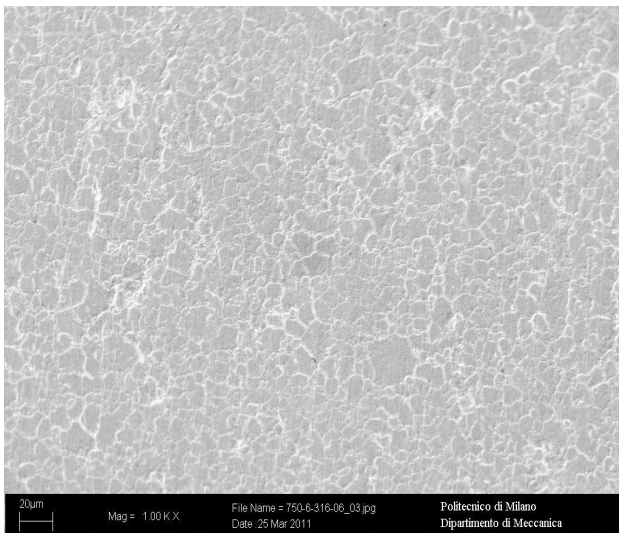


Fig. 5.77 – Aspetto dell'ossido di cromo a 750°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.

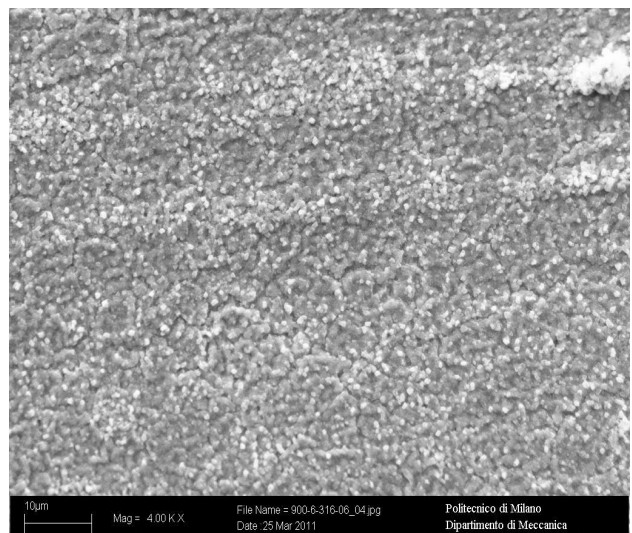
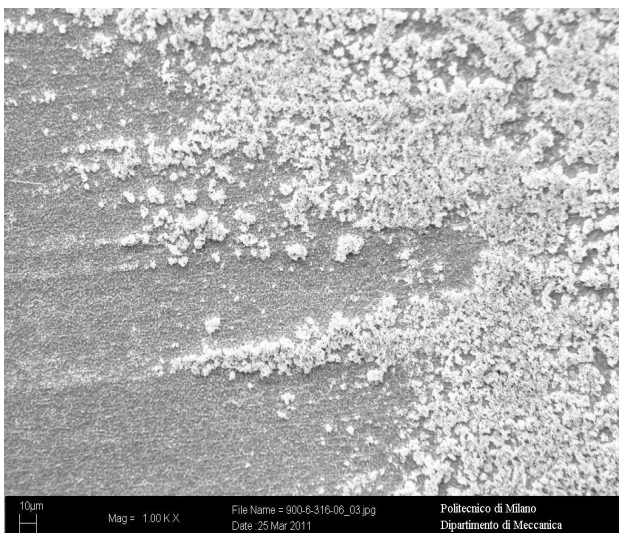


Fig. 5.78 – Aspetto dell'ossido di cromo a 900°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.

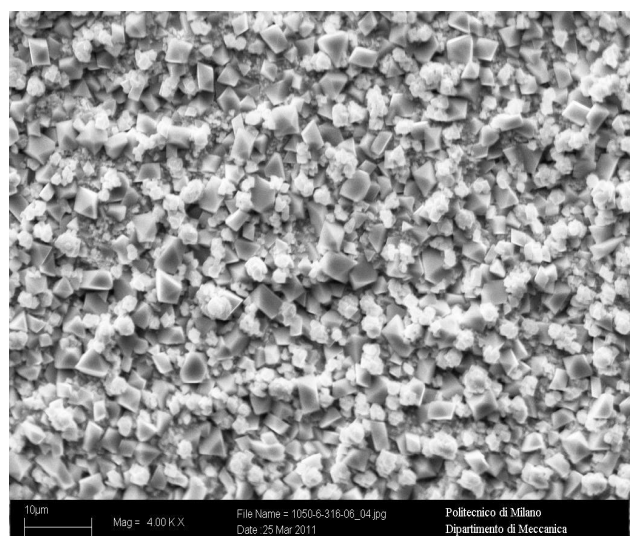
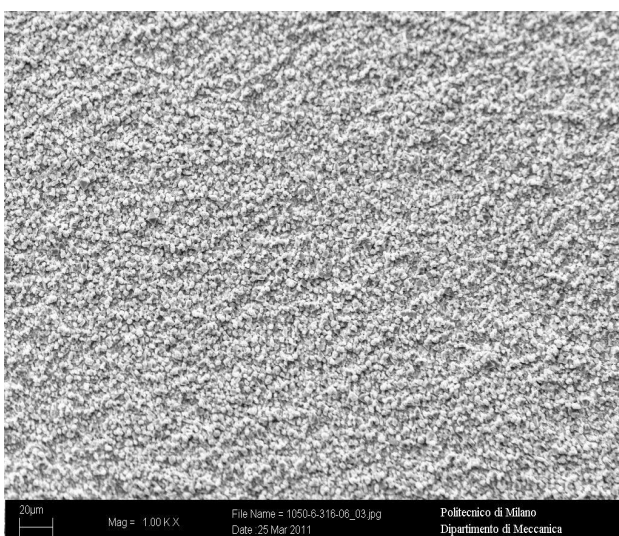


Fig. 5.79 – Aspetto dell'ossido di cromo a 1050°C per 6 ore. a) 1000x e b) 4000x.

L'analisi chimica (EDS) è stata fatta sull'ingrandimento a 100x su un'area di circa 10 mm<sup>2</sup>. I risultati sono riportati nella seguente tabella:

	% O	% Cr	% Mn	% Fe	% Ni	% Mo
<b>20-1-316-06</b>	1.02	15.45	1.01	69.11	10.82	2.58
<b>150-1-316-06</b>	0.85	15.52	1.05	70.30	9.85	2.43
<b>225-1-316-06</b>	1.23	15.86	0.58	70.44	9.83	2.06
<b>300-1-316-06</b>	1.35	15.77	1.00	69.78	9.86	2.24
<b>340-1-316-06</b>	1.43	15.74	1.11	69.90	9.74	2.08
<b>375-1-316-06</b>	1.77	15.58	0.75	69.15	10.10	2.66
<b>415-1-316-06</b>	1.94	15.48	0.89	69.35	9.85	2.48
<b>450-1-316-06</b>	2.52	15.88	1.02	68.16	9.83	2.58
<b>525-1-316-06</b>	3.88	15.67	0.82	67.33	9.89	2.40
<b>600-1-316-06</b>	8.28	14.89	0.70	64.12	9.73	2.28
<b>750-1-316-06</b>	5.57	15.37	0.86	66.20	9.80	2.20
<b>900-1-316-06</b>	12.43	17.16	1.52	58.85	8.32	1.71
<b>1050-1-316-06</b>	27.47	45.60	8.30	16.29	1.86	0.48

Tabella 5.3 – Analisi chimica (EDS) dei campioni riscaldati per 1 ora.

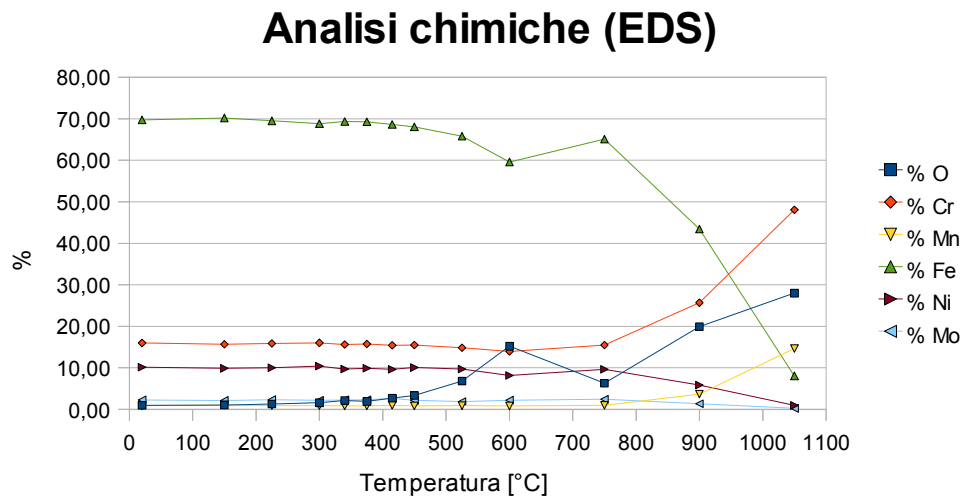


Fig. 5.80 – Andamento delle percentuali degli elementi di lega in funzione della temperatura (1 ora).

	% O	% Cr	% Mn	% Fe	% Ni	% Mo
<b>20-6-316-06</b>	0.99	15.98	0.87	69.71	10.15	2.29
<b>150-6-316-06</b>	1.04	15.67	1.06	70.19	9.89	2.15
<b>225-6-316-06</b>	1.28	15.89	0.94	69.50	10.04	2.35
<b>300-6-316-06</b>	1.59	16.03	0.92	68.84	10.42	2.21
<b>340-6-316-06</b>	2.14	15.64	0.87	69.33	9.73	2.29
<b>375-6-316-06</b>	1.91	15.74	0.84	69.29	9.90	2.32
<b>415-6-316-06</b>	2.71	15.44	0.98	68.61	9.64	2.62
<b>450-6-316-06</b>	3.34	15.50	0.84	68.07	10.08	2.17
<b>525-6-316-06</b>	6.83	14.88	0.88	65.81	9.74	1.86
<b>600-6-316-06</b>	15.21	13.94	0.83	59.60	8.19	2.23
<b>750-6-316-06</b>	6.32	15.50	0.99	65.11	9.64	2.44
<b>900-6-316-06</b>	19.95	25.69	3.67	43.45	5.87	1.38
<b>1050-6-316-06</b>	28.00	48.06	14.66	8.08	0.95	0.25

Tabella 5.4 – Analisi chimica (EDS) dei campioni riscaldati per 6 ore.



## Analisi chimiche (EDS)

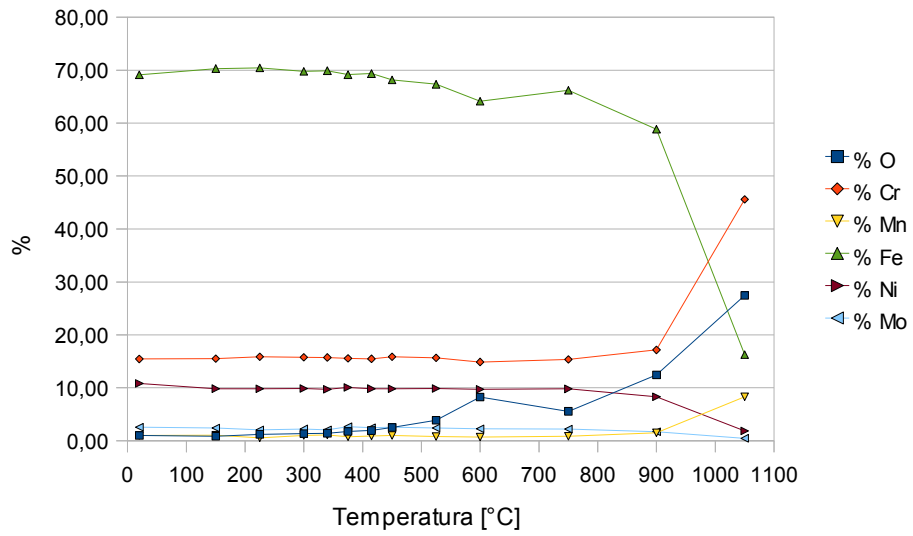


Fig. 5.81 – Andamento delle percentuali degli elementi di lega in funzione della temperatura (6 ore).

### **5.3 – Bibliografia**

- Appunti del corso di metallurgia (Politecnico di Milano)  
[A.A. 2007/2008] – M. Boniardi
- ASM handbook, volume 9 (metallography and microstructures)  
[1995]
- Gli acciai inossidabili  
[2003] – G. Di Caprio
- Introduzione agli acciai inossidabili  
[1996] – W. Nicodemi

# Conclusioni

## 6.1 – Considerazioni finali

Dall'insieme degli esperimenti svolti si possono trarre diverse conclusioni a seconda delle analisi svolte:

- analisi visiva;
- analisi fotografica;
- analisi struttura cristallina e ossidi superficiali.

Prima di trarre le opportune conclusioni è bene ricordare le ipotesi su cui si è basata la sperimentazione condotta, in modo da facilitare l'utilizzo dei risultati, evitando la loro applicazione per condizioni troppo lontane da quelle considerate durante le prove. Le ipotesi su cui è stata sviluppata l'analisi sono:

- legge di riscaldamento a gradino;
- raffreddamento in aria;
- assenza della fiamma;
- provino ovunque alla stessa temperatura.

La scelta di una legge di riscaldamento a gradino è stata imposta dalla mancanza di informazioni sul riscaldamento seguito dal componente durante l'incendio; questa ipotesi è supportata dal piccolo spessore dei componenti (0.6 mm) che fa supporre un riscaldamento molto rapido una volta investiti dal flusso di calore.

La scelta di un raffreddamento in aria è dovuta alla mancanza di informazioni sul mezzo di spegnimento, perciò si è scelto il caso più semplice del fatto che in un incendio vi sono sempre zone che non entrano in contatto con l'acqua.

L'assenza della fiamma è stata dettata dalla mancanza di un forno adeguato. Tale ipotesi non

penalizza l'analisi perché in un incendio vi sono ampie zone che non entrano in contatto diretto con la fiamma e lo strato superficiale di un componente in acciaio inossidabile si modifica anche a seguito del contatto con una fonte di calore.

L'ipotesi di temperatura omogenea in tutto il provino è giustificata dal piccolo spessore dei provini che quindi si riscaldano e si raffreddano molto velocemente senza presentare gradienti termici rilevanti al loro interno.

Dall'analisi visiva si può osservare che lo strato superficiale dei campioni di lamiera cambia colore una volta raggiunta la temperatura di 340°C. Prima di questa temperatura l'analisi visiva non può aiutare a distinguere la temperatura raggiunta durante l'incendio né la durata dello stesso. Inoltre, i provini presentano una colorazione omogenea fino alla temperatura di 400°C circa e oltre i 750°C. Nell'intervallo di temperatura intermedio i campioni presentano delle macchie di differente colorazione dovute quasi sicuramente a fenomeni legati alle condizioni sperimentali: derivanti soprattutto dal fatto che il riscaldamento e il raffreddamento avvengono in aria.

L'analisi fotografica non ha portato ai risultati auspicati all'inizio della sperimentazione. Tuttavia si può affermare che l'efficacia del light box e la taratura delle fotocamere non sia da mettere in discussione: la struttura costruita per svolgere l'analisi fotografiche risulta essere efficace in quanto le fotografie effettuate sullo stesso campione sono da considerare statisticamente uguali. A questo va aggiunta anche l'applicazione del pacchetto hardware e software per la taratura delle macchine fotografiche che ha contribuito a limitare le differenze costruttive delle fotocamere (in particolare sensore digitale e ottiche). Le difficoltà evidenziate durante l'analisi statistica sono da attribuire alle macchie di differente colorazione che si individuano su alcuni campioni nell'intervallo di temperatura che va dai 400 a 650°C circa: questa disomogeneità di colorazione porta ad un cambiamento dei valori di media e deviazione standard degli istogrammi RGB da cui derivano le difficoltà nelle verifiche dei residui. Tuttavia è ragionevole pensare che la colorazione superficiale delle lamiere dipendano principalmente dai due fattori temperatura e tempo e che il test di Tukey svolto per le medie dei tre canali rosso, verde e blu sia da considerarsi valido.

L'analisi metallografica, svolta con l'ausilio del microscopio ottico, ci mostra come la struttura cristallina dei campioni cambi solo per temperature elevate (oltre i 900°C) e che i fenomeni di *recovery* e *ricristallizzazione* modificano la dimensione del grano. Il fenomeno di precipitazione dei carburi a bordo grano non si verifica in quanto il materiale utilizzato per la sperimentazione è un acciaio inossidabile austenitico *low carbon* (AISI 316L). L'analisi degli ossidi superficiali, svolta con l'ausilio del microscopio a scansione elettronica, mostra come la

morfologia dell'ossido di cromo si modifica oltre i 600°C; fino a questa temperatura l'ossido risulta essere compatto e ben adeso alla superficie del componente. Oltre i 600°C l'ossido si sfalda e comincia a staccarsi in scaglie dalla superficie.

# Allegato A

## Programma di calcolo per costruire gli istogrammi RGB

```
clear all
close all
clc
%%%%% Acquisizione Dati %%%%%
[nome_foto,percorso_foto] = uigetfile (*.png,'Seleziona le foto');
cd (percorso_foto);
foto_colori = imread(nome_foto);
[righe colonne profondita] = size(foto_colori);
%%%%% Calcolo Istogrammi RGB %%%%%
profondita_colore = 255;
classi_colori = (0:1:profondita_colore);
i = 1;
j = 1;
k = 1;
a = 1;
valori_istogramma = zeros(profondita,profondita_colore+1);
for i = 1:1:profondita
    for j = 1:1:colonne
        for k = 1:1:righe
            for a = 1:1:profondita_colore+1
                if foto_colori(k,j,1) && foto_colori(k,j,2) && foto_colori(k,j,3) == 255
                    break
                elseif foto_colori(k,j,i) == classi_colori (1,a);
                    valori_istogramma(i,a) = valori_istogramma(i,a)+1;
                    break
                end
            end
        end
    end
    a = 1;
end
end
end
%%%%% RED %%%%%
%%%%% Calcolo istogrammi RGB zona d'interesse %%%%%
j=1;
for a = 1:1:profondita_colore+1
    if valori_istogramma(1,a) ~= 0
        R_gauss_spe_y (j) = valori_istogramma(1,a);
        R_gauss_spe_x (j) = a-1;
        j=j+1;
    end
end
end
%%%%% Calcolo media e deviazione standard campionarie %%%%%
for b = 1:1:length(R_gauss_spe_x)
    R_parziale = R_gauss_spe_x(b)*ones(1,R_gauss_spe_y(b));
```

```

if b == 1
    R_totale = R_parziale;
else
    R_totale = [R_totale R_parziale];
end
clear R_parziale
end
[R_media,R_dev_std] = normfit(R_totale);
[R_media_lettere,R_dev_std_lettere] = num2str_mio(R_media,R_dev_std);
%%%%% GREEN %%%%%%
%%%%% Calcolo istogrammi RGB zona d'interesse %%%%%%
j=1;
for a = 1:1:profondita_colore+1
    if valori_istogramma(2,a) ~= 0
        G_gauss_spe_y (j) = valori_istogramma(2,a);
        G_gauss_spe_x (j) = a-1;
        j=j+1;
    end
end
%%%%% Calcolo media e deviazione standard campionarie %%%%%%
for b = 1:1:length(G_gauss_spe_x)
    G_parziale = G_gauss_spe_x(b)*ones(1,G_gauss_spe_y(b));
    if b == 1
        G_totale = G_parziale;
    else
        G_totale = [G_totale G_parziale];
    end
    clear G_parziale
end
[G_media,G_dev_std] = normfit(G_totale);
[G_media_lettere,G_dev_std_lettere] = num2str_mio(G_media,G_dev_std);
%%%%% BLU %%%%%%
%%%%% Calcolo Istogrammi RGB zona d'interesse %%%%%%
j=1;
for a = 1:1:profondita_colore+1
    if valori_istogramma(3,a) ~= 0
        B_gauss_spe_y (j) = valori_istogramma(3,a);
        B_gauss_spe_x (j) = a-1;
        j=j+1;
    end
end
%%%%% Calcolo media e deviazione standard campionarie %%%%%%
for b = 1:1:length(B_gauss_spe_x)
    B_parziale = B_gauss_spe_x(b)*ones(1,B_gauss_spe_y(b));
    if b == 1
        B_totale = B_parziale;
    else
        B_totale = [B_totale B_parziale];
    end
end

```

```

end
clear B_parziale
end
[B_media,B_dev_std] = normfit(B_totale);
[B_media_lettere,B_dev_std_lettere] = num2str_mio(B_media,B_dev_std);
%%%%% PLOT Istogrammi %%%%%
lim_sup_asse_x = classi_colori(length(classi_colori))+1;
lim_inf_asse_x = classi_colori(1);
lim_sup_asse_y = 80000;
lim_inf_asse_y = 0;
subplot(2,3,1),
bar (classi_colori,valori_istogramma(1,:),'r')
title('RED (ROSSO)','FontSize',13)
axis([lim_inf_asse_x lim_sup_asse_x lim_inf_asse_y lim_sup_asse_y])
box_testo1=['Media: ' R_media_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-6000,box_testo1,'FontSize',12)
box_testo2=['DevStd: ' R_dev_std_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-13000,box_testo2,'FontSize',12)
box_testo3=['Pixels: ' num2str(length(R_totale))];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-20000,box_testo3,'FontSize',12)
subplot(2,3,2),
bar (classi_colori,valori_istogramma(2,:),'g')
title('GREEN (VERDE)','FontSize',13)
axis([lim_inf_asse_x lim_sup_asse_x lim_inf_asse_y lim_sup_asse_y])
box_testo1=['Media: ' G_media_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-6000,box_testo1,'FontSize',12)
box_testo2=['DevStd: ' G_dev_std_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-13000,box_testo2,'FontSize',12)
box_testo3=['Pixels: ' num2str(length(G_totale))];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-20000,box_testo3,'FontSize',12)
subplot(2,3,3),
bar (classi_colori,valori_istogramma(3,:),'c')
title('BLU (BLU)','FontSize',13)
axis([lim_inf_asse_x lim_sup_asse_x lim_inf_asse_y lim_sup_asse_y])
box_testo1=['Media: ' B_media_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-6000,box_testo1,'FontSize',12)
box_testo2=['DevStd: ' B_dev_std_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-13000,box_testo2,'FontSize',12)
box_testo3=['Pixels: ' num2str(length(B_totale))];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-20000,box_testo3,'FontSize',12)
subplot(2,3,4),
bar (classi_colori,valori_istogramma(1,:),'r')
title('INUTILE','FontSize',12)
axis([lim_inf_asse_x lim_sup_asse_x lim_inf_asse_y lim_sup_asse_y])
box_testo1=['Media: ' R_media_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-6000,box_testo1,'FontSize',11)
box_testo2=['DevStd: ' R_dev_std_lettere];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-12000,box_testo2,'FontSize',11)

```



```

box_testo3=["Pixels: ' num2str(length(R_totale))"];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-18000,box_testo3,'FontSize',11)
subplot(2,3,5),
bar (classi_colori,valori_istogramma(2,:),'g')
title('INUTILE','FontSize',12)
axis([lim_inf_asse_x lim_sup_asse_x lim_inf_asse_y lim_sup_asse_y])
box_testo1=["Media: ' G_media_lettere"];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-6000,box_testo1,'FontSize',11)
box_testo2=["DevStd: ' G_dev_std_lettere"];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-12000,box_testo2,'FontSize',11)
box_testo3=["Pixels: ' num2str(length(G_totale))"];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-18000,box_testo3,'FontSize',11)
subplot(2,4,6),
bar (classi_colori,valori_istogramma(3,:),'b')
title('INUTILE','FontSize',12)
axis([lim_inf_asse_x lim_sup_asse_x lim_inf_asse_y lim_sup_asse_y])
box_testo1=["Media: ' B_media_lettere"];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-6000,box_testo1,'FontSize',11)
box_testo2=["DevStd: ' B_dev_std_lettere"];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-12000,box_testo2,'FontSize',11)
box_testo3=["Pixels: ' num2str(length(B_totale))"];
text(lim_inf_asse_x+7,lim_sup_asse_y-18000,box_testo3,'FontSize',11)

```