

**Progetto Nazionale MURST 2005**  
**TECNOLOGIE INNOVATIVE AD ALTO RENDIMENTO NEL**  
**RISCALDAMENTO AD INDUZIONE PER TRATTAMENTI TERMICI**  
**DI BILLETTE E NASTRI DI ALLUMINIO**

**Sottoprogetto Unità di BOLOGNA**  
**RISCALDAMENTO AD INDUZIONE DI BILLETTE DI ALLUMINIO**  
**MEDIANTE ROTAZIONE IN CAMPI MAGNETICI**  
**STAZIONARI PRODOTTI DA MAGNETI SUPERCONDUTTIVI**

**Massimo Fabbri, Antonio Morandi, Pier Luigi Ribani**  
**Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Bologna**  
**Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Italia**  
[massimo.fabbri@mail.ing.unibo.it](mailto:massimo.fabbri@mail.ing.unibo.it)  
[antonio.morandi@mail.ing.unibo.it](mailto:antonio.morandi@mail.ing.unibo.it)

**Michele Forzan, Sergio Lupi**  
**Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Padova**  
**Via Gradenigo, 6/A - 35131 Padova, Italia**  
[sergio.lupi@unipd.it](mailto:sergio.lupi@unipd.it)  
[michele.forzan@unipd.it](mailto:michele.forzan@unipd.it)

**Sommario:** Questo documento descrive la validazione sperimentale del modello elettromagnetico sviluppato dall'unità di Bologna tramite il confronto con i risultati del test di riscaldamento su una billetta rotante, svolte presso il Laboratorio di Elettrotermia dell'unità di Padova.

## Indice

<b>1.</b>	<b>Descrizione del Test .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Ipotesi di calcolo.....</b>	<b>4</b>
	2.1 Le proprietà termiche ed elettriche della billetta	
	2.2 La misura della resistività della billetta	
	2.3 La valutazione delle perdite	
<b>3.</b>	<b>Simulazione della prova a 1500 rpm.....</b>	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b>Simulazione della prova a 1000 rpm.....</b>	<b>10</b>
<b>5.</b>	<b>Simulazione della prova a 2000 rpm.....</b>	<b>11</b>
<b>6.</b>	<b>Simulazione della prova a 3000 rpm.....</b>	<b>12</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>13</b>
<b>8.</b>	<b>Appendice 1: dati sperimentali della prova a 1500 rpm .....</b>	<b>14</b>
<b>9.</b>	<b>Appendice 2: dati sperimentali della prova a 1000 rpm .....</b>	<b>24</b>
<b>10.</b>	<b>Appendice 3: dati sperimentali della prova a 2000 rpm .....</b>	<b>32</b>
<b>11.</b>	<b>Appendice 4: dati sperimentali della prova a 3000 rpm .....</b>	<b>44</b>

## 1. Descrizione del Test

Il test riguarda la fattibilità ingegneristica del processo di riscaldamento di una billetta di alluminio rotante in un campo magnetico stazionario e la validazione del codice di analisi elettromagnetico e termico sviluppato dall'unità di Bologna. La geometria e le principali caratteristiche del dispositivo dimostrativo in scala di laboratorio sono illustrate in [Fabbri2007b]. Le prove sperimentali sono state condotte in data 5 ottobre e 6 dicembre 2007 presso il Laboratorio di Elettrotermia dell'unità di Padova. La figura 1.1 mostra il set-up sperimentale. Il sistema in prova è costituito da un rullo PLANTEX con billetta di alluminio (verniciata con colore nero resistente ad alta temperatura) ancorata al sistema rotante ed immersa nel campo magnetico generato dai magneti permanenti. Per la sicurezza del dispositivo e degli operatori si è scelto di effettuare le prove di riscaldamento a 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm e 3000 rpm potendo raggiungere in tali condizioni il regime termico nella billetta. I risultati numerici riportati in questa relazione sono stati ottenuti attraverso il codice sviluppato dall'unità di Bologna. Il codice UNIBO e la geometria della mesh utilizzata sono descritti in [Breschi2006].

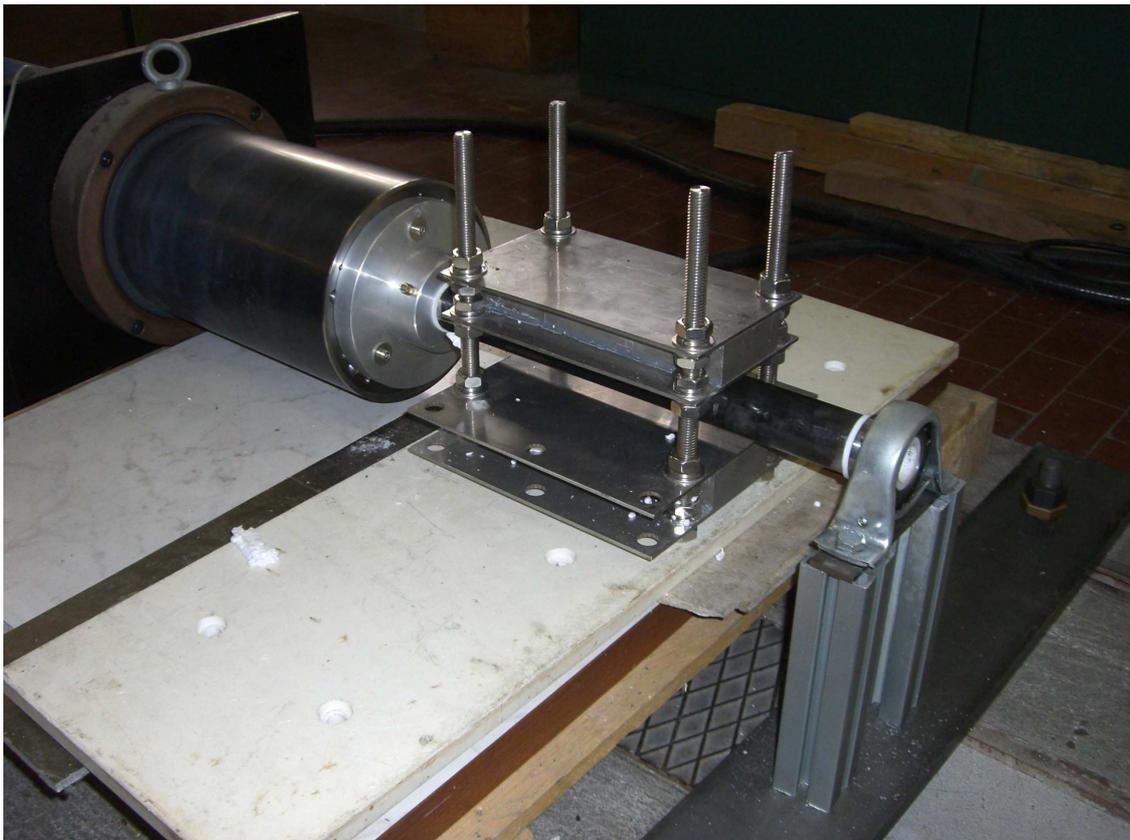


Figura 1.1 – Set-up sperimentale del test di laboratorio.

## 2. Ipotesi di calcolo

### 2.1. Le proprietà termiche ed elettriche della billetta

Le simulazioni numeriche preliminari effettuate hanno mostrato che:

1. la resistività elettrica e la conducibilità termica relative all'alluminio puro [Tsalaf1981] non permettono di riprodurre i risultati sperimentali. Pertanto, sulla base dei dati riportati in Tabella 2.1 [web1] per le leghe di alluminio, si è scelto di variare le curve di resistività (+65%) e conducibilità termica (-39%) dedotte da [Tsalaf1981]. A 20 °C la resistività e la conducibilità termica utilizzati per la simulazione del processo sono rispettivamente 4.5E-6 ohm-cm e 145 W/m-K. Si è scelto invece di lasciare inalterate il calore specifico e la densità in quanto il prodotto densità – calore specifico risulta poco variabile.

Tabella 2.1 Caratteristiche di alcuni tipi di leghe di alluminio commerciali. [web1]

Material Name [20°C]	Electrical Resistivity, ohm-cm	Specific Heat Capacity, J/g-°C	Th. Conductivity, W/m-K	Density, g/cc
Aluminium (Tsalaf1981)	2.72E-06	0.893	237	2.702
Aluminum7475-T761	4.32E-06	0.88	147	2.81
Aluminum7021-T62	4.50E-06	0.88	140	2.78
Aluminum7039-T61	4.50E-06	0.88	140	2.74
Aluminum7005-T53	4.50E-06	0.875	148	2.78
Aluminum2218-T61	4.50E-06	0.88	148	2.81
Aluminum4043-H14	4.40E-06	0.85	150	2.69
Aluminum4043-H16	4.40E-06	0.85	150	2.69
Aluminum4043-H18	4.40E-06	0.85	150	2.69
Aluminum2124-T351	4.40E-06	0.882	150	2.78
Aluminum7029-T5	4.60E-06	0.88	140	2.77
Aluminum6010-T4	4.40E-06	0.89	151	2.71

2. la temperatura calcolata cala diversamente, durante la fase di raffreddamento in regime di convezione naturale, rispetto a quanto previsto utilizzando il coefficiente di scambio termico in [Fabbri2007b]. Pertanto, la relazione adottata è la seguente:

$$Nu = 0.5 \left( Pr \left( 6Gr + \frac{Re^2}{2} \right) \right)^{0.27} \quad (2.0)$$

Il numero di Nusselt ( $Nu = hD/k$ ), il numero di Prandtl ( $Pr = c_{ppv}/k$ ), e il numero di Reynolds ( $Re = uD/v$ ) utilizzati sono definiti in [Fabbri2007a]. Il numero di Grashof ( $Gr = g \beta (T_{sup} - T_{far})D^3/v^2$ ) è stato modificato considerando  $T_{sup}$  pari alla temperatura locale alla superficie della billetta.

## 2.2. La misura della resistività della billetta

Per la misura della resistività della billetta in alluminio sono stati utilizzati:

- Un alimentatore Lambda ZUP 10-80, in grado di erogare una tensione massima di 10 V e una corrente massima di 80 A.
- Due multimetri Agilent 34401A.
- Un trasduttore di corrente ad effetto Hall
- Una scheda di acquisizione National Instruments PCI-6281

La figura 2.1 mostra il sistema di misura. L'alimentatore è stato utilizzato come generatore di corrente. La corrente è stata variata fra 10 e 80 A ad intervalli di 10 A. Per maggiore precisione, il valore effettivo di corrente è stato misurato mediante trasduttore di corrente collegato a scheda di acquisizione dati NI PCI-6281.

I due multimetri Agilent 34401A sono stati utilizzati per la misura della tensione su due prese aventi morsetti a distanza rispettivamente di 100 mm e 200 mm posti sulla billetta. Le misure sono state effettuate a temperatura ambiente (circa 20 °C) e in acqua bollente (circa 100 °C). La resistività misurata a 20 °C è risultata pari a 4.62E-6 ohm-cm.

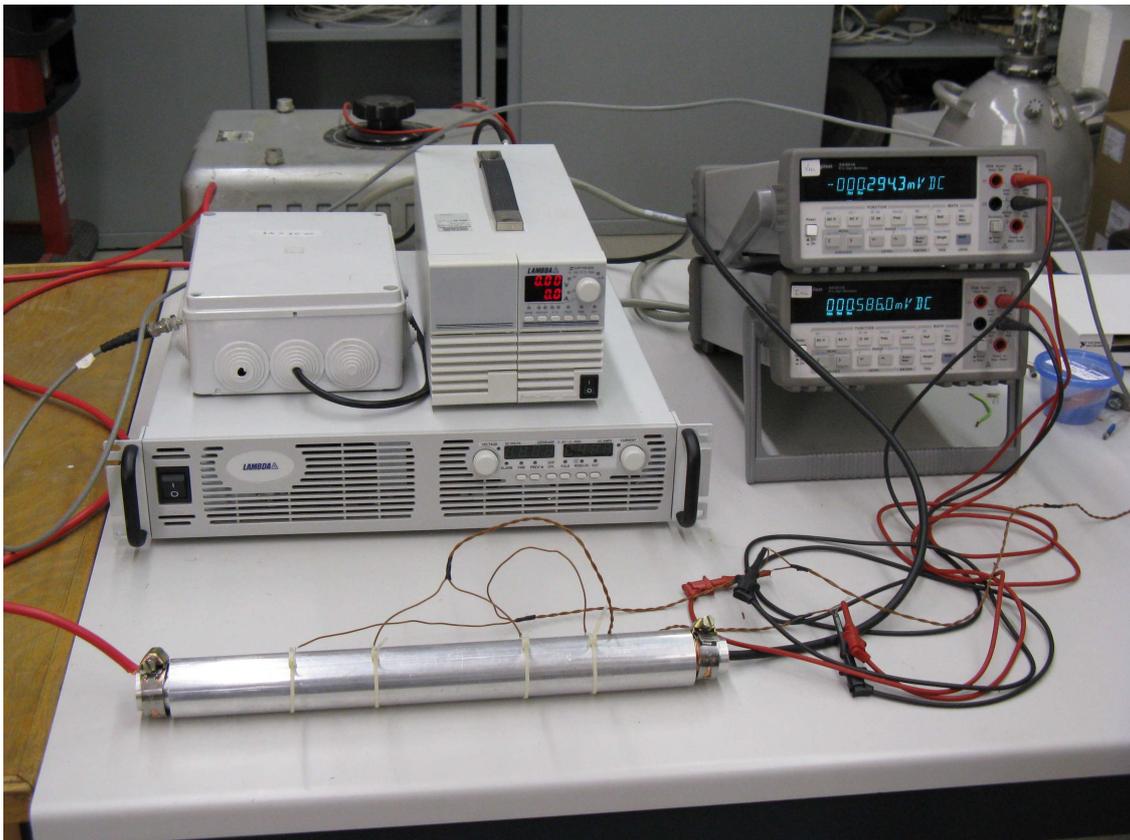


Figura 2.1 – Sistema di misura della resistività della billetta.

### 2.3. La valutazione delle perdite

I risultati sperimentali (vedi figura 3.3) mostrano che la differenza tra la potenza totale misurata e la potenza a vuoto sovrastima significativamente la potenza termica calcolata dal codice UNIBO. Tuttavia, la potenza misurata a vuoto (riportata in Tabella 2.2) non comprende le perdite nel rame degli avvolgimenti del motore in condizioni di carico, che sono decisamente maggiori che nel funzionamento a vuoto. Al fine di stimare la potenza termica, si è assunto che il rendimento del Motore/Azionamento ( $\eta_{M/A}$ ) abbia l'andamento mostrato in figura 2.2. Tale rendimento, dipendente dalla potenza totale  $P$ , è confrontato con i dati che si riferiscono a macchine asincrone commerciali [web2]. Si è supposto quindi che, al variare delle condizioni di funzionamento, il rendimento  $\eta_{M/A}$  sia all'interno degli intervalli di variazione specificati in figura 2.2.

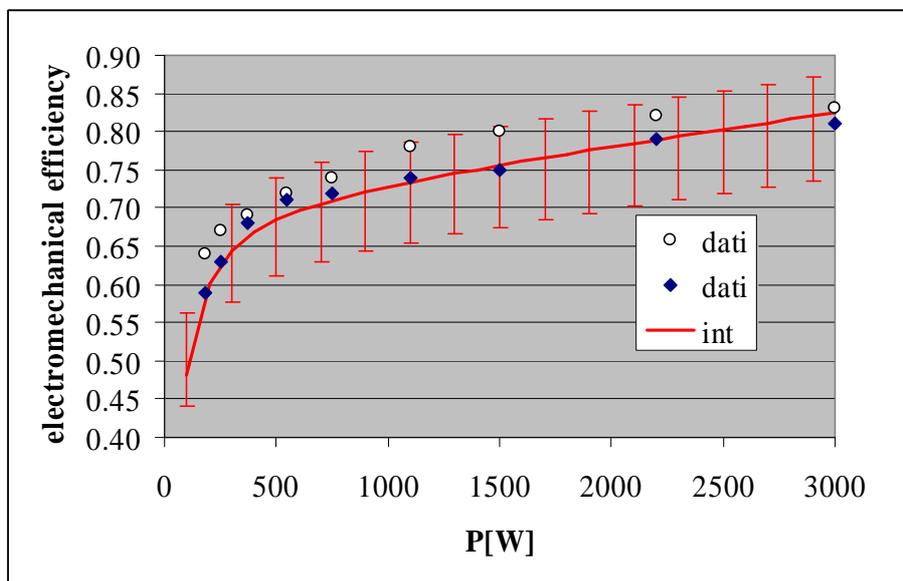


Figura 2.2 – Stima del Rendimento del Motore/Azionamento (dati [web2]).

Si possono stimare quindi le perdite “elettriche” nel rame e nel ferro del motore asincrono e dell’azionamento ( $Q_e$ ), al variare della potenza totale come:

$$Q_e(P) = P [1 - \eta_{M/A}(P)] \quad (2.1)$$

Le perdite “meccaniche” per attrito nei cuscinetti e per ventilazione ( $Q_m$ ) sono assunte costanti durante ogni prova e quindi valutate a partire dalla misura della potenza a vuoto ( $P_0$ ) come:

$$Q_m = P_0 - Q_e(P_0) \quad (2.2)$$

La potenza termica fornita alla billetta ( $P_{Heat}$ ) è stata stimata tramite la relazione:

$$P_{Heat} = P - Q_m - Q_e(P) \quad (2.3)$$

L'andamento di  $P_{\text{Heat}}$  nelle varie prove è riportato nelle figure 3.2, 4.2, 5.2 e 6.2 (curve in rosso). Gli intervalli di variazione specificati sono quelli corrispondenti all'ipotesi fatta sul rendimento del Motore/Azionamento di figura 2.2.

La tabella 2.2 mostra i risultati della stima delle perdite per attrito nei cuscinetti e per ventilazione calcolate con la (2.2) ed il rendimento stimato del processo di riscaldamento ( $\eta_{\text{Heating}}$ ) valutato tramite la relazione:

$$\eta_{\text{Heating}} = P_{\text{Heat}} / (P_{\text{Heat}} + Q_m) \quad (2.4)$$

Dato che la potenza termica fornita alla billetta varia durante il processo di riscaldamento, per la valutazione della (2.4) si è utilizzato il valore medio calcolato con il codice UNI-BO. Come si evince dai risultati, l'efficienza stimata del processo è comunque superiore al 50% dei riscaldatori a induzione convenzionali, pur non essendo il dispositivo sperimentale stesso ottimizzato per l'efficienza di riscaldamento.

Tabella 2.2 Potenze a vuoto misurate, stima delle perdite per attrito e ventilazione e stima del rendimento del processo di riscaldamento.

# Test	n	Experimental No Load Power	Estimated Ventilation and Friction Losses	Heating Efficiency
	[rpm]	[W]	[W]	[%]
1	1000	265	150 ↔ 184	<b>56 ↔ 61</b>
2	1500	320	186 ↔ 227	<b>68 ↔ 72</b>
3	2000	390	232 ↔ 282	<b>74 ↔ 77</b>
4	3000	500	305 ↔ 369	<b>81 ↔ 84</b>

### 3. Simulazione della prova a 1500 rpm

La figura 3.1 mostra le temperature, massima e minima, sperimentali e calcolate tramite il codice UNIBO, durante la prova di riscaldamento a 1500 rpm. Le barre di errore sono pari al 10% dei valori misurati a causa dell'incertezza sull'emissività della billetta (che si è supposta pari a 0.97). La figura 3.2 mostra la potenza totale  $P$  assorbita dal motore (e dall'azionamento) durante la prova. Sulla stessa figura è anche riportata la differenza fra la potenza totale e la potenza  $P_0$  assorbita dal motore a vuoto a 1500 rpm (320 W) e la potenza  $P_R$  resa sull'albero del motore (al netto delle perdite nel cuscinetto) stimata con un modello di perdite elementare illustrato nella sezione 2. La discrepanza tra  $P_R$  e  $P-P_0$  è dovuta alle perdite per effetto Joule negli avvolgimenti durante il funzionamento sotto carico. La potenza  $P_R$  è quella effettivamente ceduta alla billetta e utilizzata ai fini del riscaldamento (potenza termica). In figura 3.2 è riportato anche l'andamento della potenza termica calcolata numericamente.

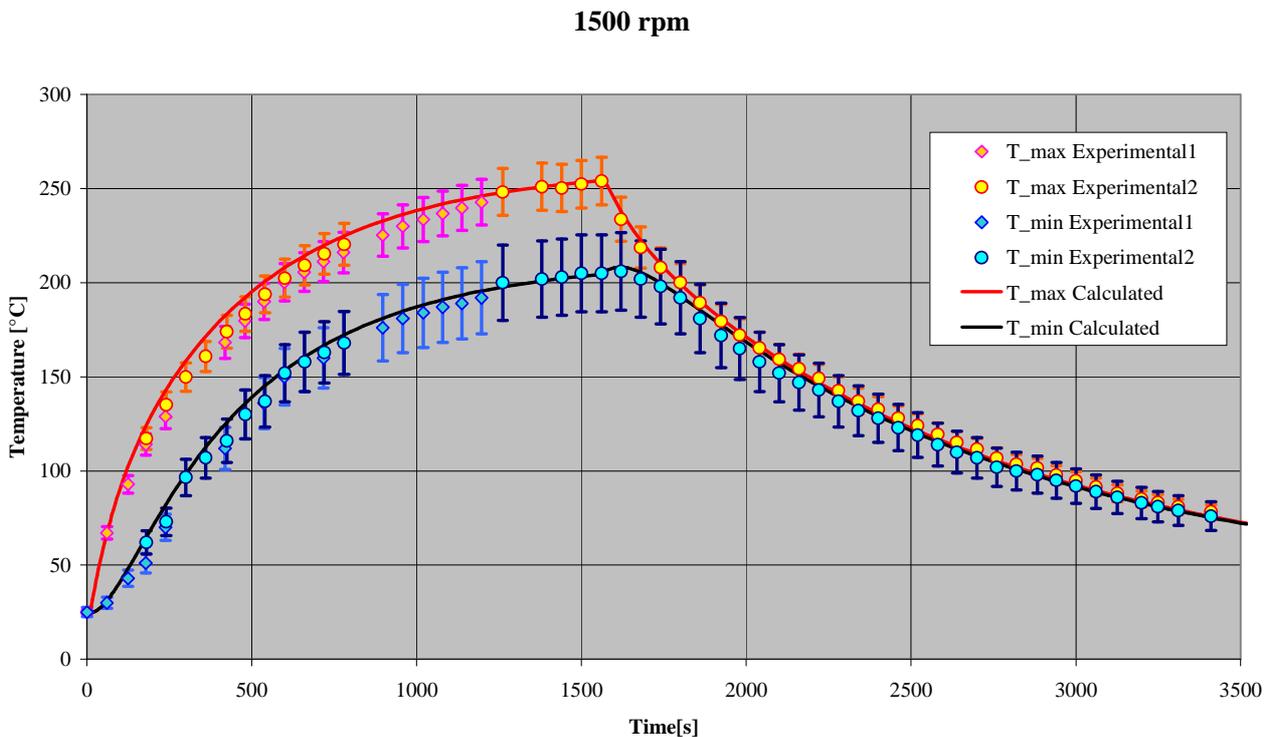


Figura 3.1. - Temperature minima e massima misurate e calcolate durante la prova a 1500 rpm.

**1500 rpm**

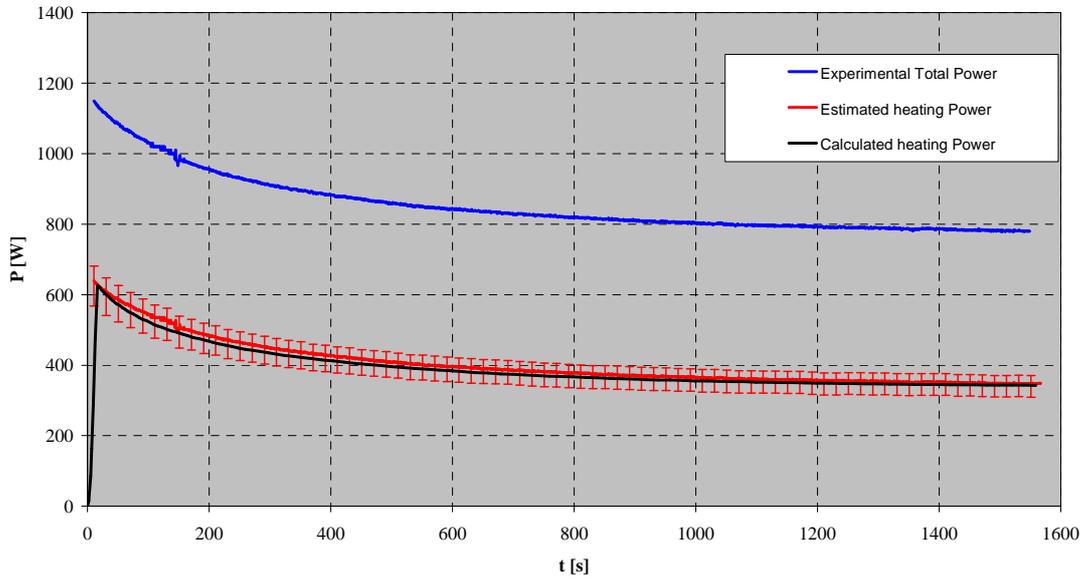


Figura 3.2 - Potenze misurate e calcolate durante la prova di riscaldamento a 1500 rpm.

**1500 rpm**

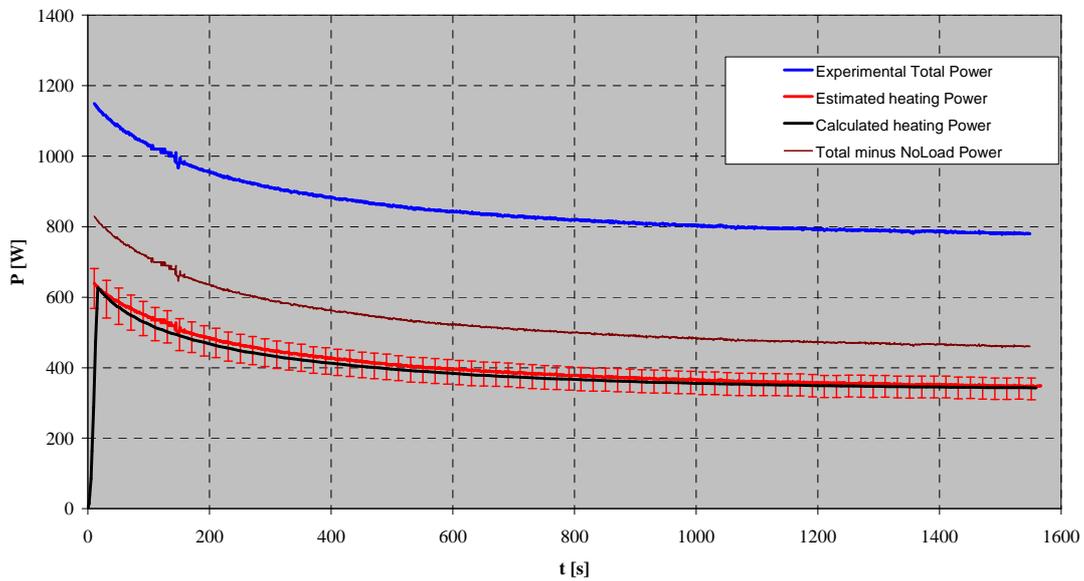


Figura 3.3 - Potenze misurate e calcolate durante la prova di riscaldamento a 1500 rpm.

## 4. Simulazione della prova a 1000 rpm

Nelle figure 4.1 e 4.2 è mostrato il confronto tra i risultati numerici e sperimentali relativi alla prova di riscaldamento alla velocità di 1000 rpm.

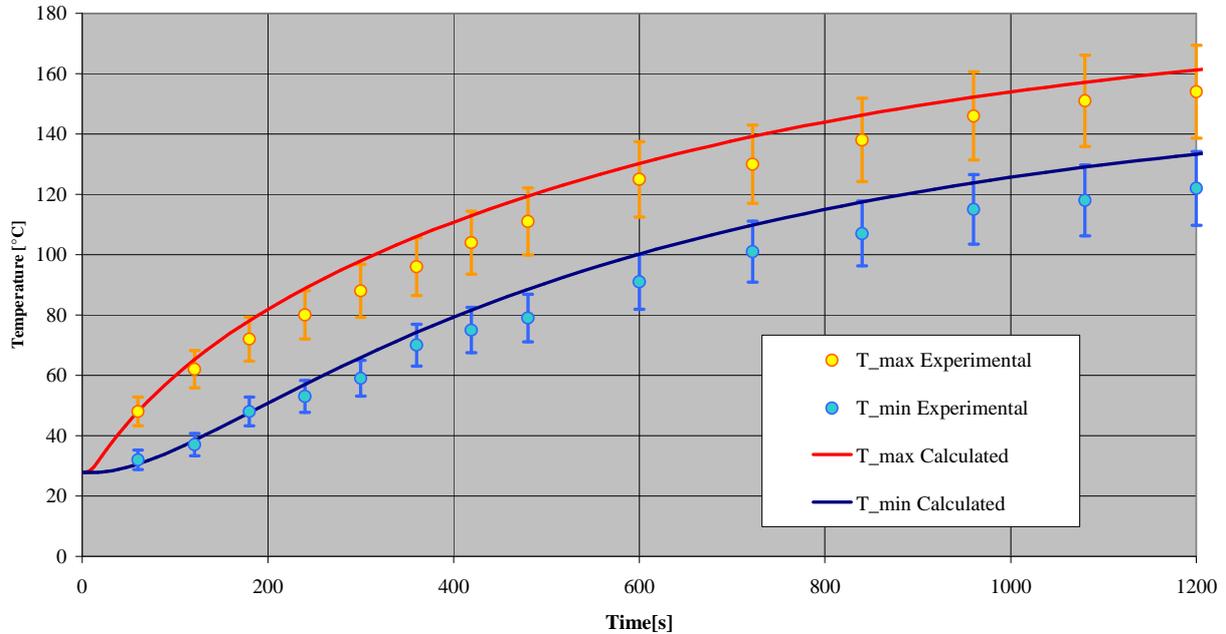


Figura 4.1 - Temperature minima e massima misurate e calcolate durante la prova a 1000 rpm.

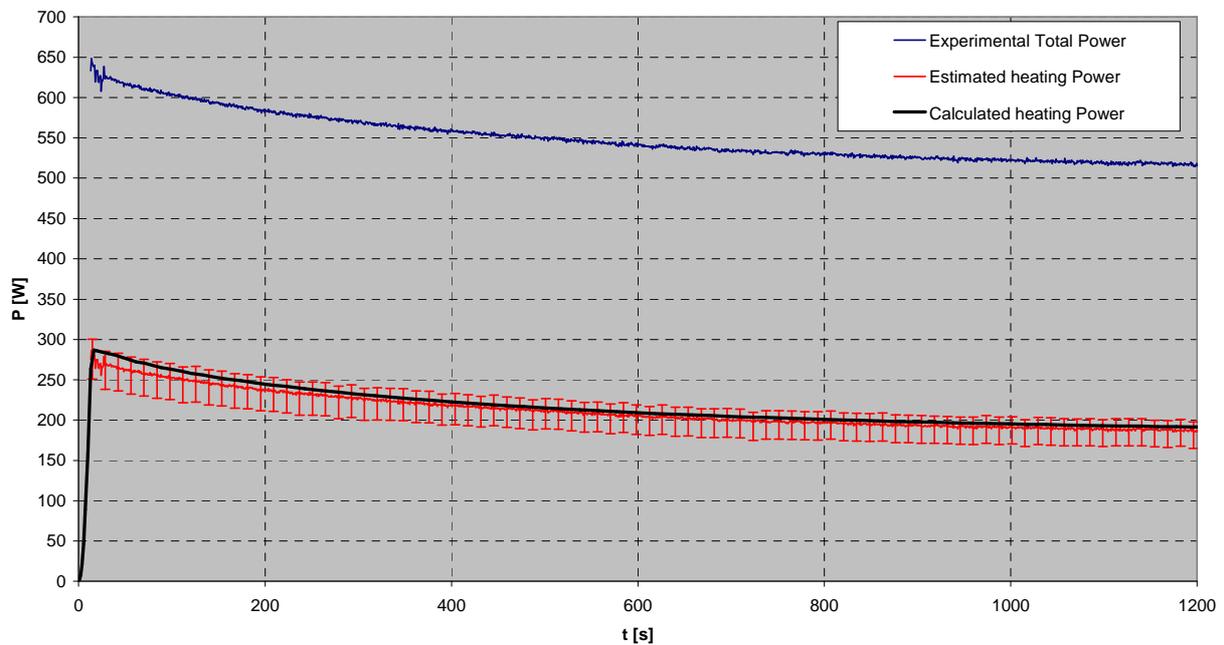


Figura 4.2 - Potenze misurate e calcolate durante la prova di riscaldamento a 1000 rpm.

## 5. Simulazione della prova a 2000 rpm

Nelle figure 5.1 e 5.2 è mostrato il confronto tra i risultati numerici e sperimentali relativi alla prova di riscaldamento alla velocità di 2000 rpm.

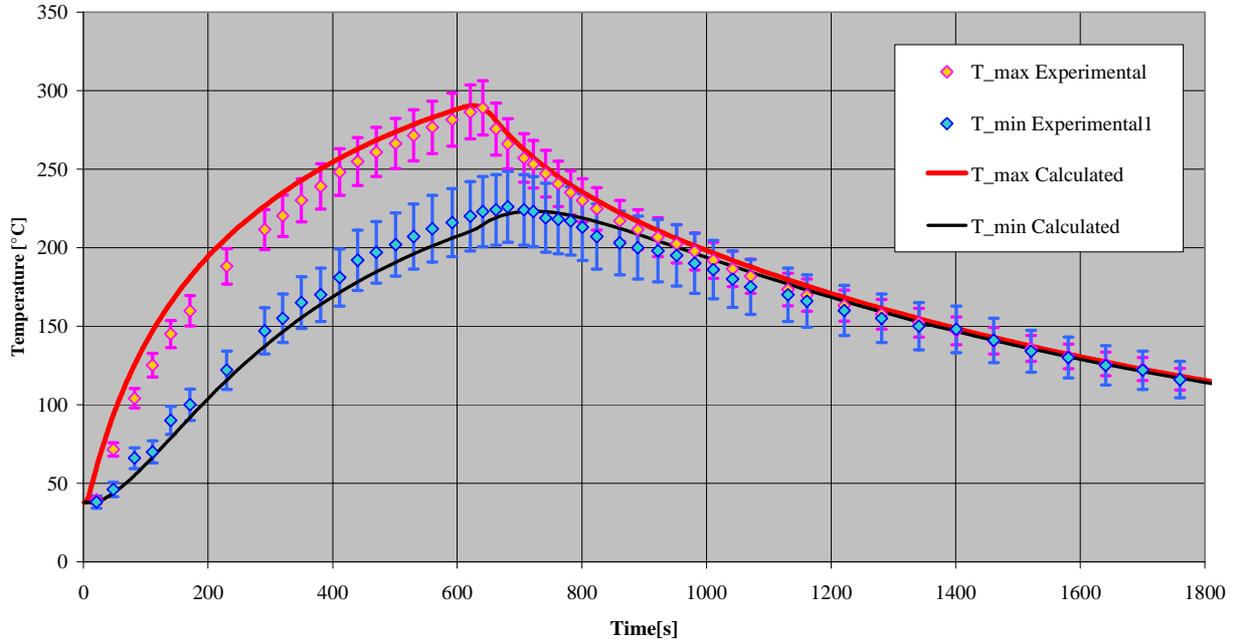


Figura 5.1 - Temperature minima e massima misurate e calcolate durante la prova a 2000 rpm.

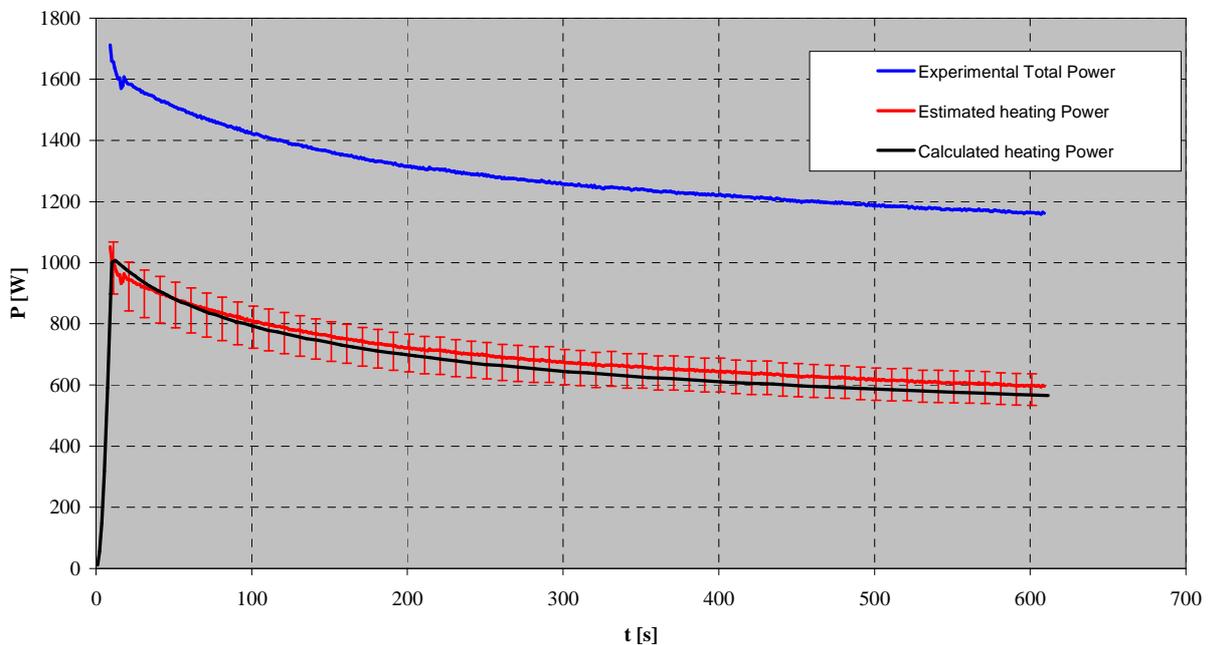


Figura 5.2 - Potenze misurate e calcolate durante la prova di riscaldamento a 2000 rpm.

## 6. Simulazione della prova a 3000 rpm

Nelle figure 3.1 e 3.2 è mostrato il confronto tra i risultati numerici e sperimentali relativi alla prova di riscaldamento alla velocità di 3000 rpm.

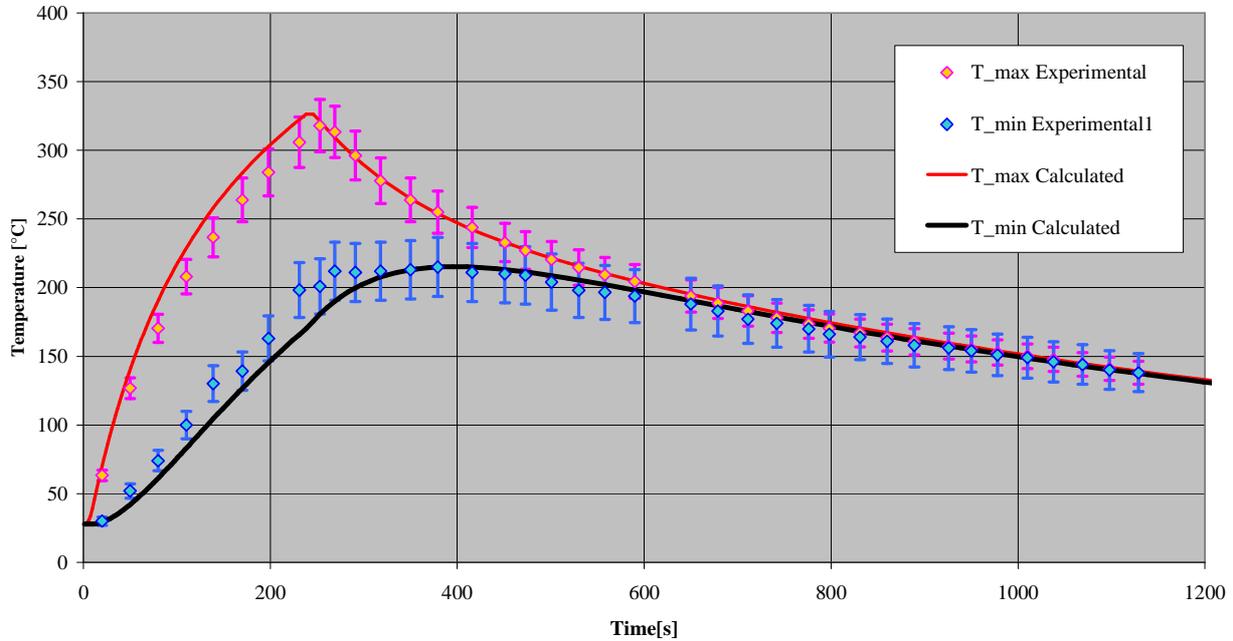


Figura 6.1 - Temperature minima e massima misurate e calcolate durante la prova a 3000 rpm.

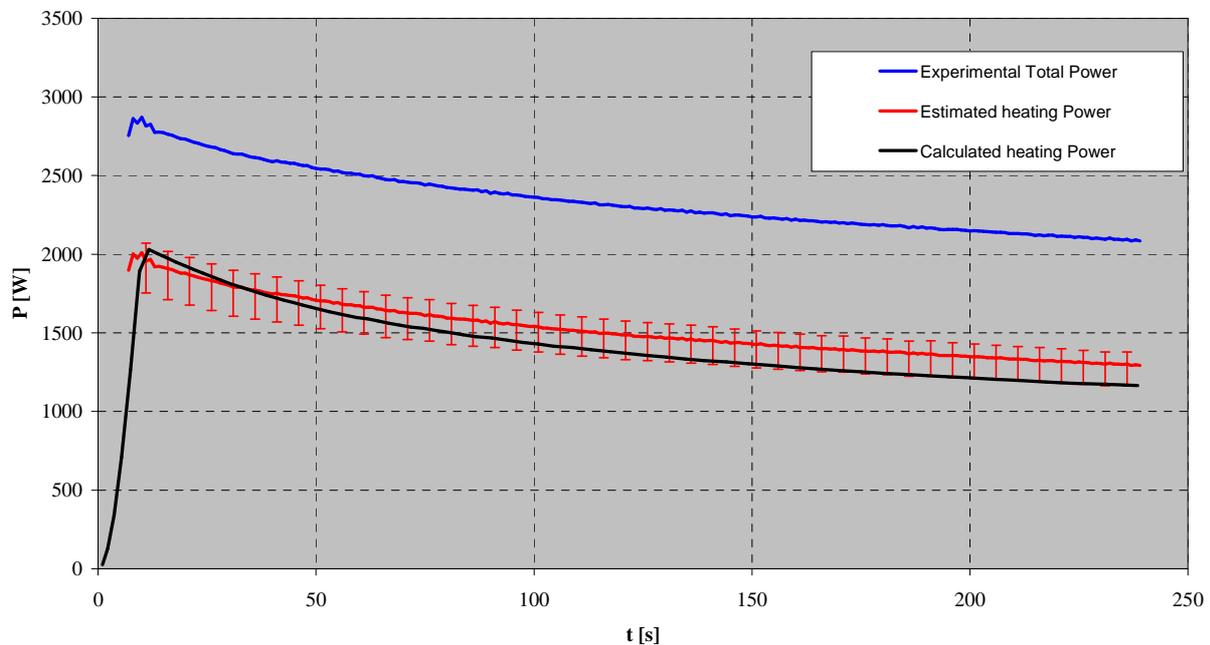


Figura 6.2 - Potenze misurate e calcolate durante la prova di riscaldamento a 3000 rpm.

## 7. Bibliografia

- [Breschi2006] M. Breschi, M. Fabbri, A. Morandi, P.L. Ribani, Relazione PRIN2005 “Tecnologie innovative ad alto rendimento nel riscaldamento ad induzione per trattamenti termici di billette e nastri di alluminio”– Sottoprogetto UNIBO - Settembre 2006.
- [Fabbri2007a] M. Fabbri, A. Morandi, P.L. Ribani, Relazione PRIN2005 “Tecnologie innovative ad alto rendimento nel riscaldamento ad induzione per trattamenti termici di billette e nastri di alluminio”– Sottoprogetto UNIBO - Febbraio 2007.
- [Fabbri2007b] M. Fabbri, A. Morandi, P.L. Ribani, Relazione PRIN2005 “Tecnologie innovative ad alto rendimento nel riscaldamento ad induzione per trattamenti termici di billette e nastri di alluminio”– Sottoprogetto UNIBO - Luglio 2007.
- [Tsalaf1981] A. Tsalaf, *Combined properties of conductors*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1981
- [web1] [www.matweb.com/search/SearchProperty.asp](http://www.matweb.com/search/SearchProperty.asp)
- [web2] [www.elettronicasanterno.it/system/files/documents/materiale/Motori%20ATA%20XB%202005\\_rev.01.pdf](http://www.elettronicasanterno.it/system/files/documents/materiale/Motori%20ATA%20XB%202005_rev.01.pdf)

## 8. Appendice 1: dati sperimentali della prova a 1500 rpm

Strumentazione di misura: Wattmetro YOKOGAWA WT 230 collegato a monte dell'intero sistema rotante (Circuiti di controllo compresi). Thermocamera AVIO TVS 2000 MK-II.

Note: la fase iniziale (circa 15 secondi) in cui la velocità del motore deve raggiungere la condizione di regime, non è riportata nel grafico relativo all'andamento temporale della potenza assorbita.

La potenza totale misurata a vuoto (sistema rotante in assenza dei magneti) nella condizione di velocità di regime pari a 1500 giri/minuto risulta pari a 320 W.

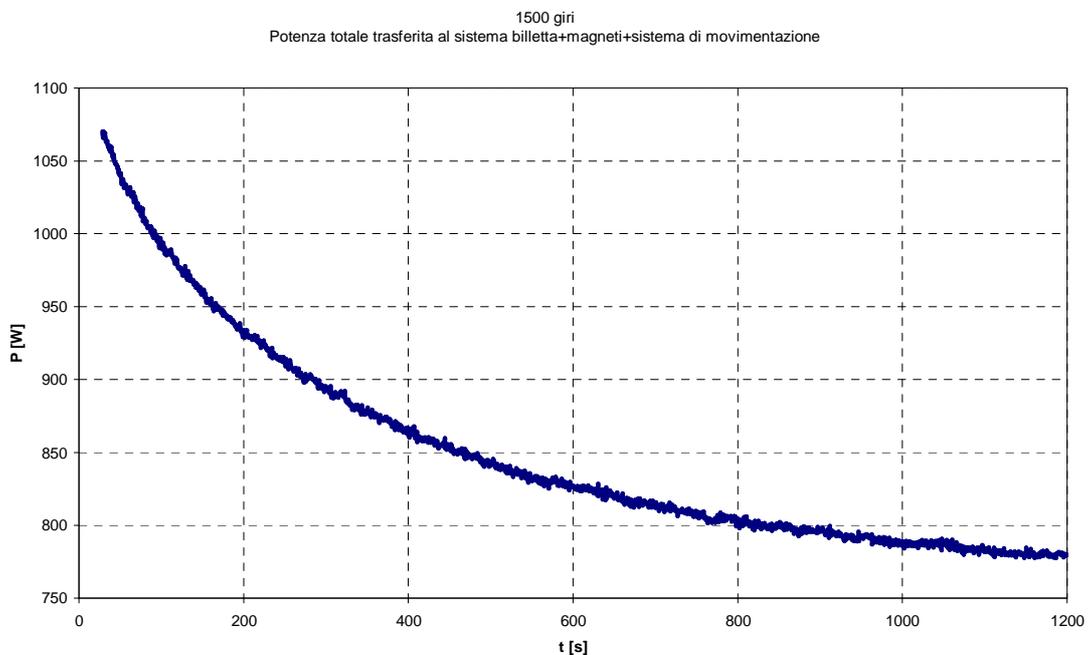


Figura 8.1 – Prova a 1500 giri: potenza totale misurata a monte del sistema.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

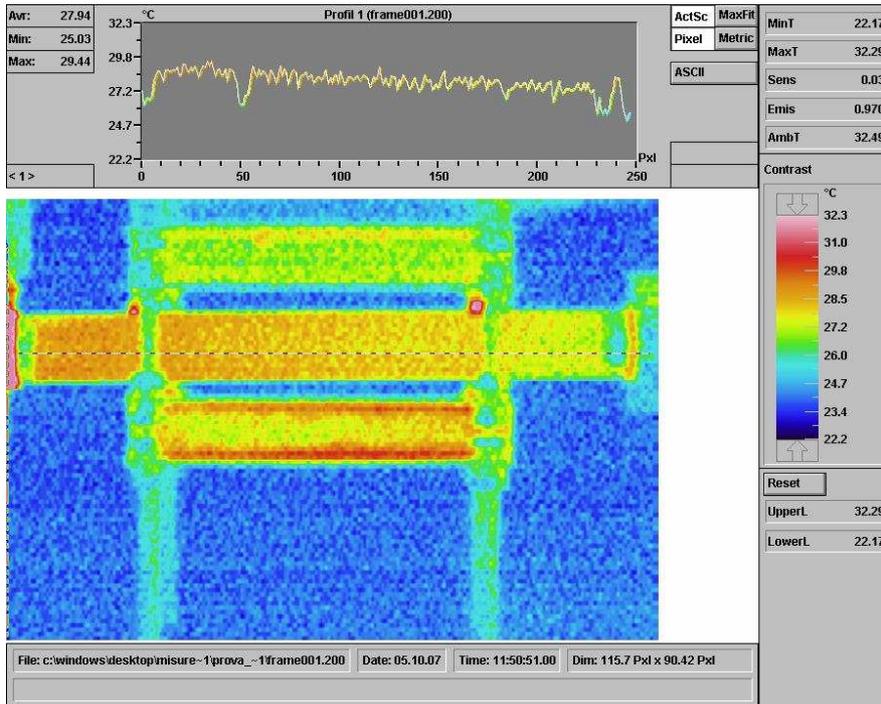


Figura 8.2 – Prova a 1500 giri: istante iniziale.

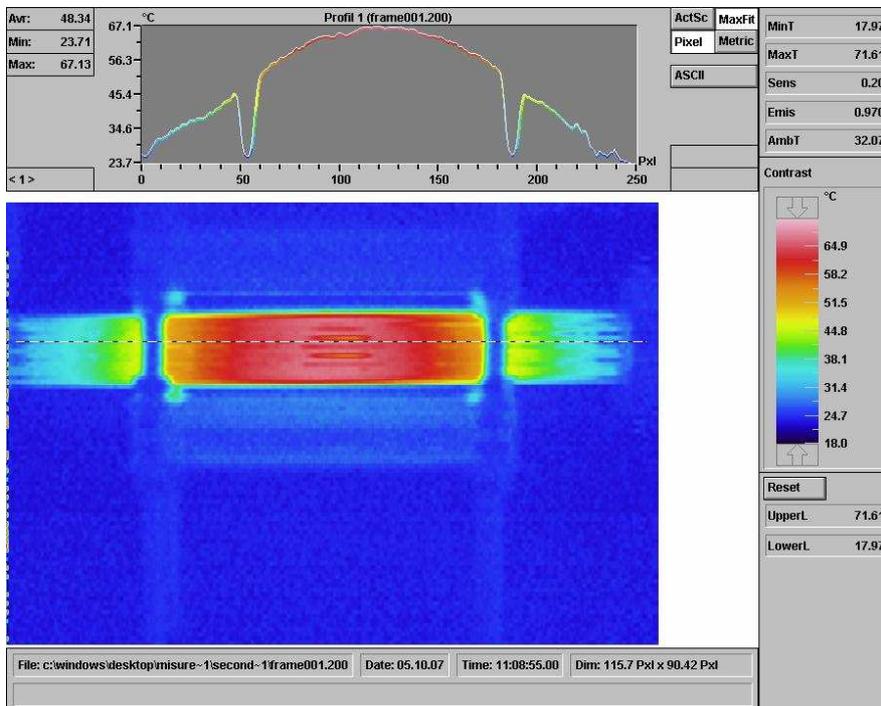


Figura 8.3 – Prova a 1500 giri: 1 minuto.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

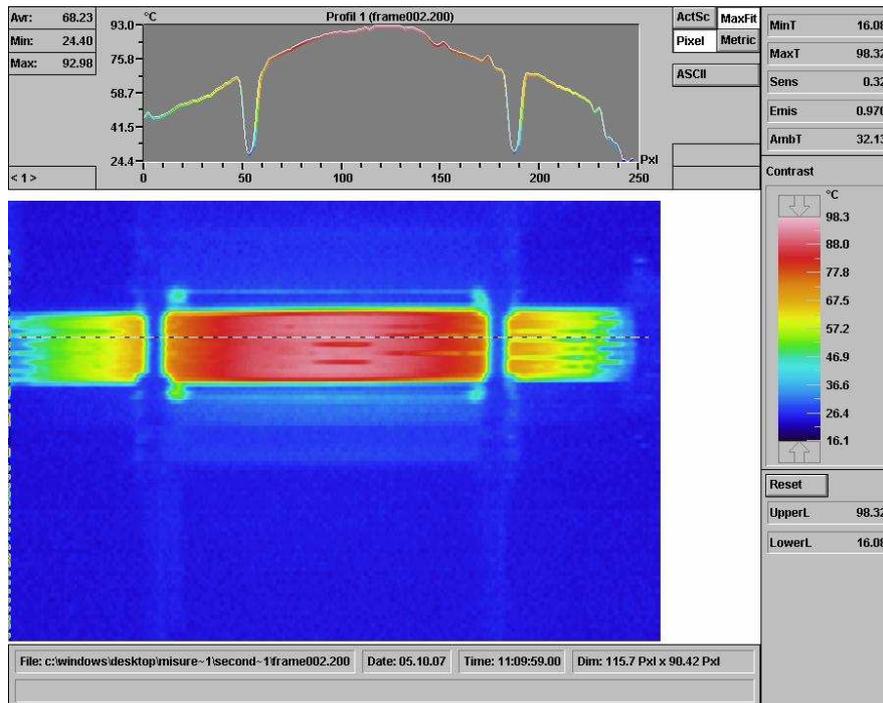


Figura 8.4 – Prova a 1500 giri: 2 minuti.

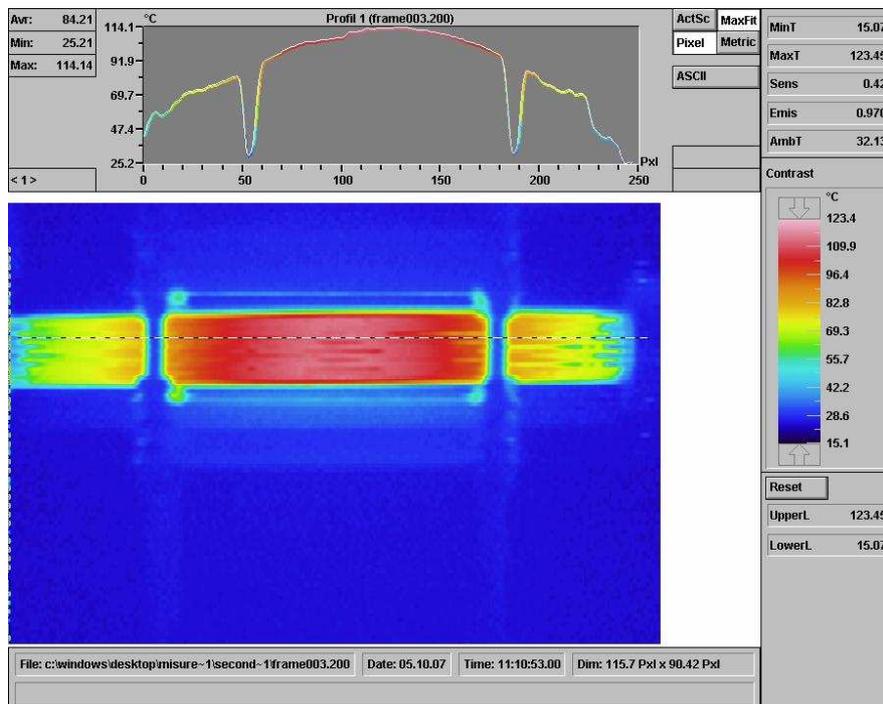


Figura 8.5 – Prova a 1500 giri: 3 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

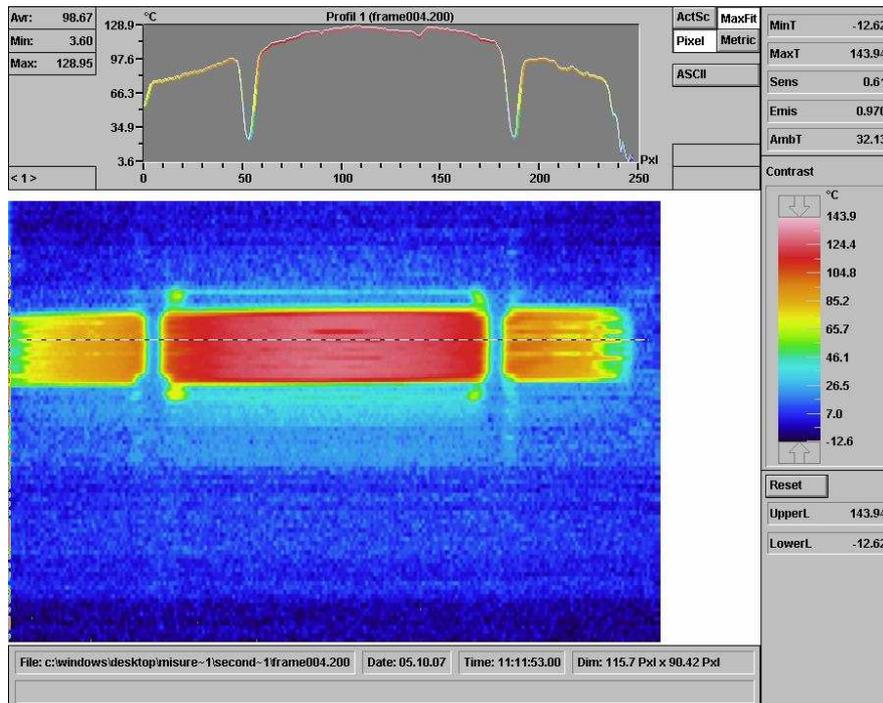


Figura 8.6 – Prova a 1500 giri: 4 minuti.

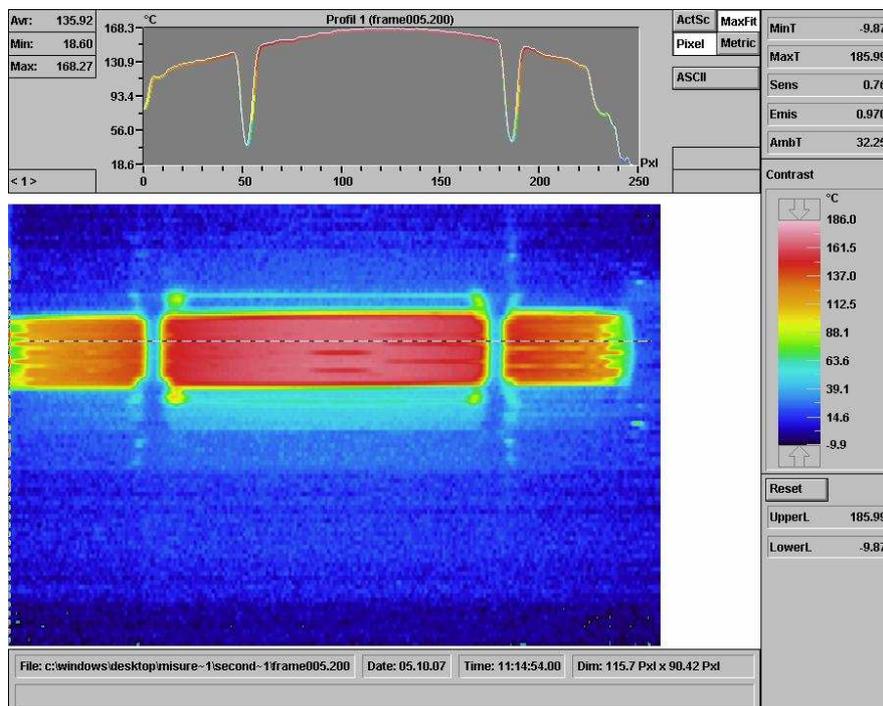


Figura 8.7 – Prova a 1500 giri: 7 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

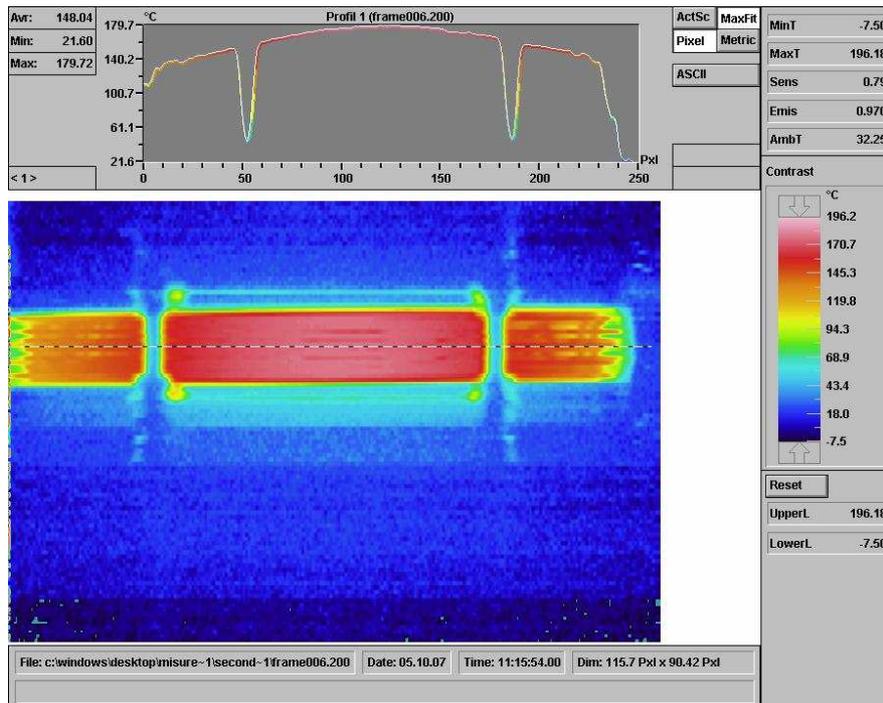


Figura 8.8 – Prova a 1500 giri: 8 minuti.

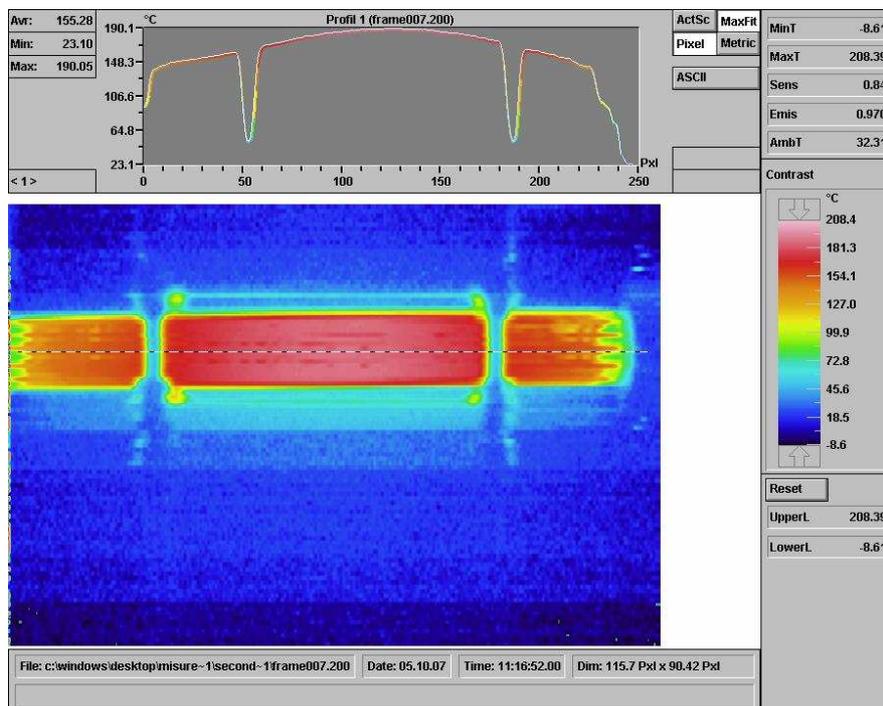


Figura 8.9 – Prova a 1500 giri: 9 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

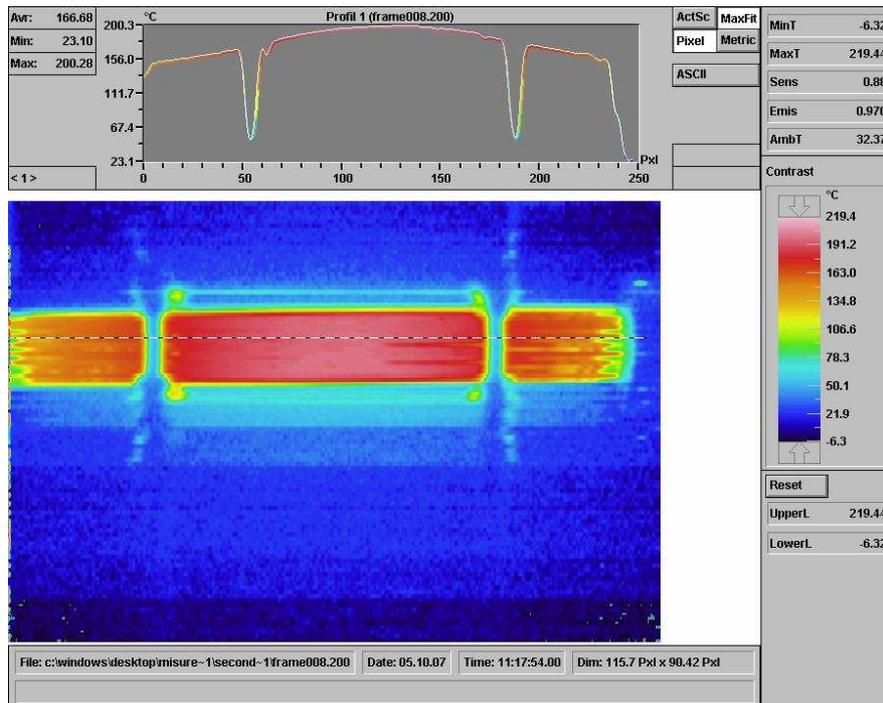


Figura 8.10 – Prova a 1500 giri: 10 minuti.

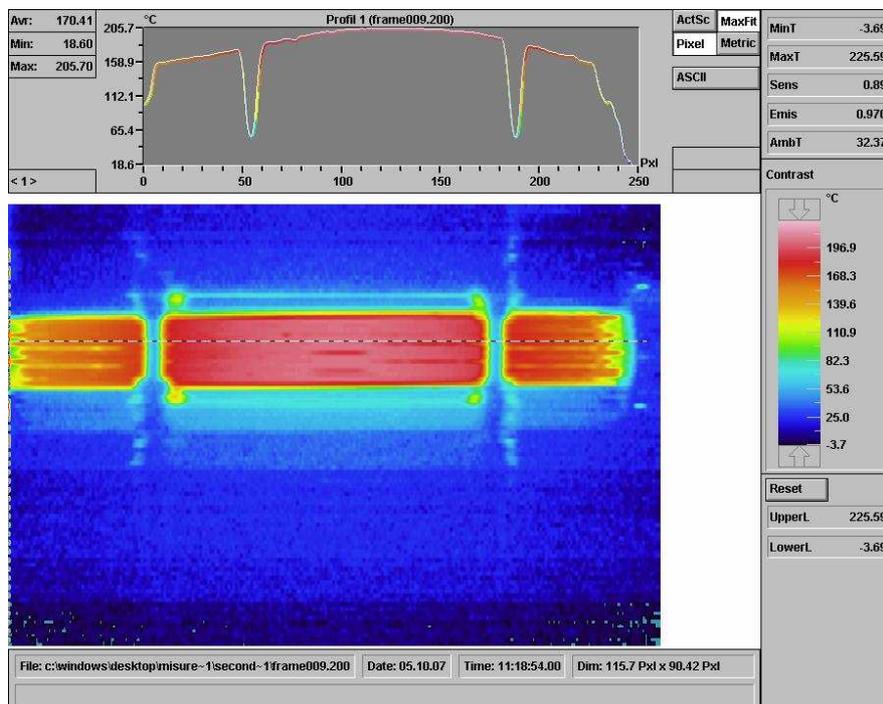


Figura 8.11 – Prova a 1500 giri: 11 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

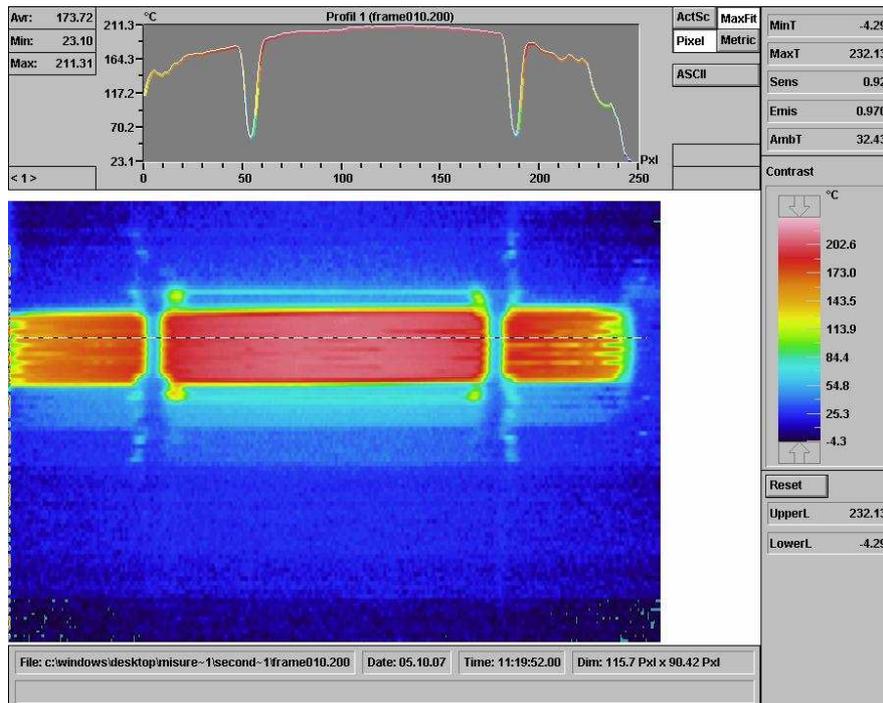


Figura 8.12 – Prova a 1500 giri: 12 minuti.

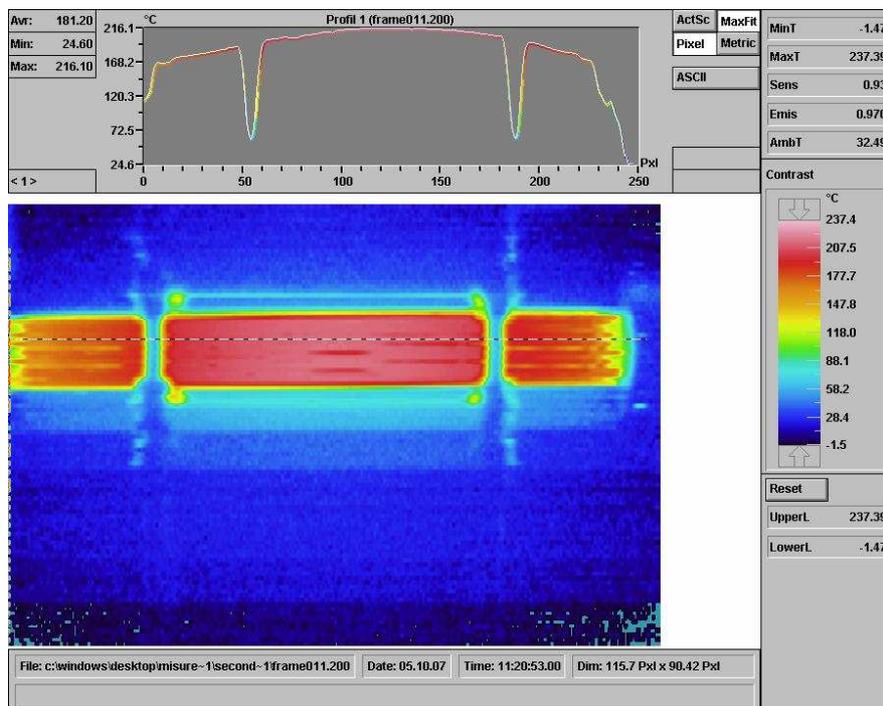


Figura 8.13 – Prova a 1500 giri: 13 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

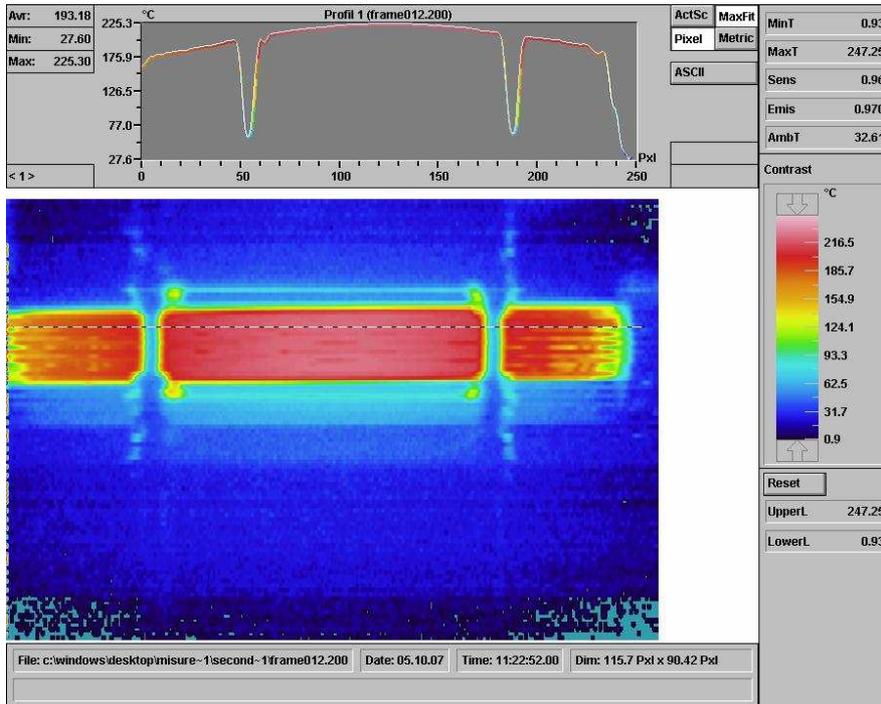


Figura 8.14 – Prova a 1500 giri: 15 minuti.

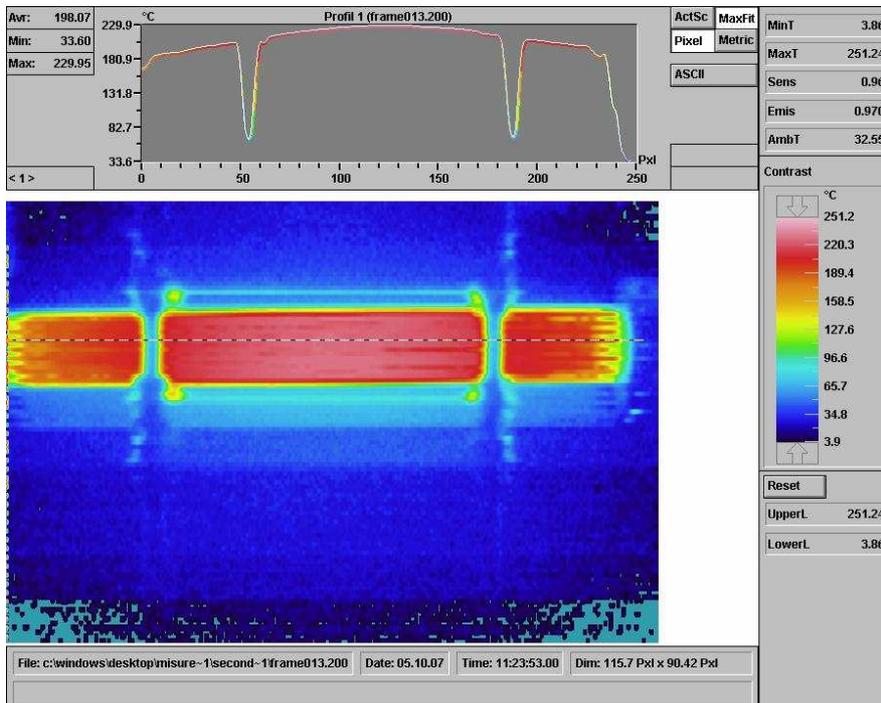


Figura 8.15 – Prova a 1500 giri: 16 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

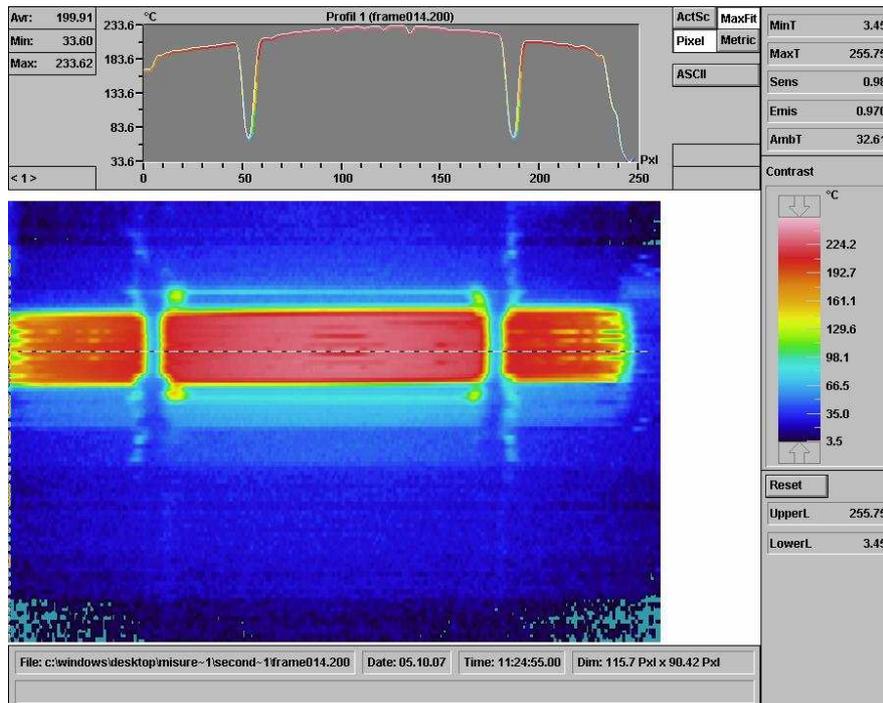


Figura 8.16 – Prova a 1500 giri: 17 minuti.

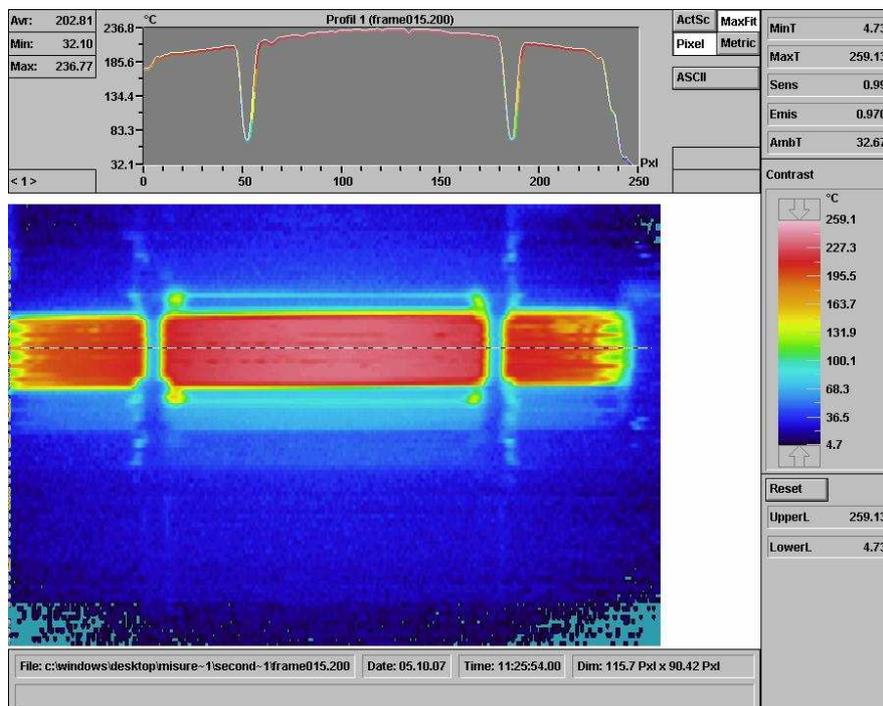


Figura 8.17 – Prova a 1500 giri: 18 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

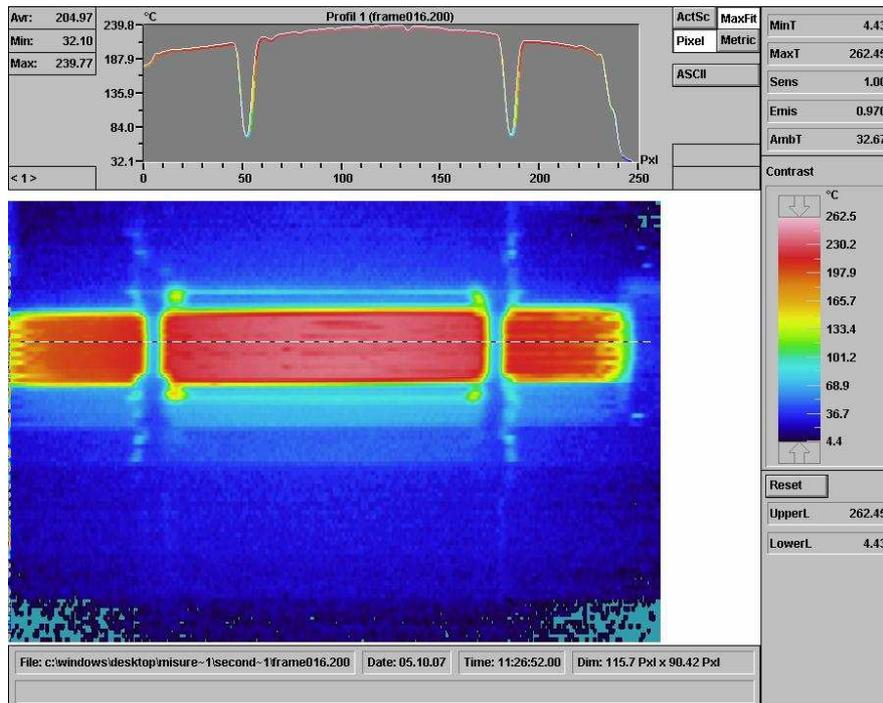


Figura 8.18 – Prova a 1500 giri: 19 minuti.

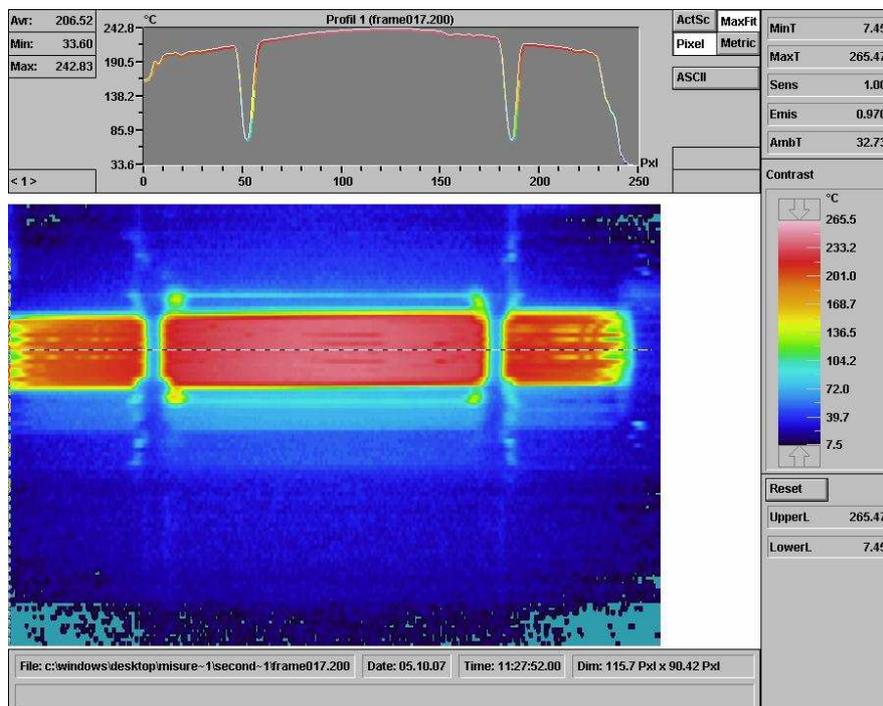


Figura 8.19 – Prova a 1500 giri: 20 minuti.

## 9. Appendice 2: dati sperimentali della prova a 1000 rpm

Strumentazione di misura: Wattmetro YOKOGAWA WT 230 collegato a monte dell'intero sistema rotante (Circuiti di controllo compresi). Thermocamera AVIO TVS 2000 MK-II.

Note: la fase iniziale (circa 10 secondi) in cui la velocità del motore deve raggiungere la condizione di regime, non è riportata nel grafico relativo all'andamento temporale della potenza assorbita. Termine della prova: condizione di regime termico della billetta.

La potenza totale misurata a vuoto (sistema rotante in assenza dei magneti) nella condizione di velocità di regime pari a 1000 giri/minuto risulta pari a 265 W.

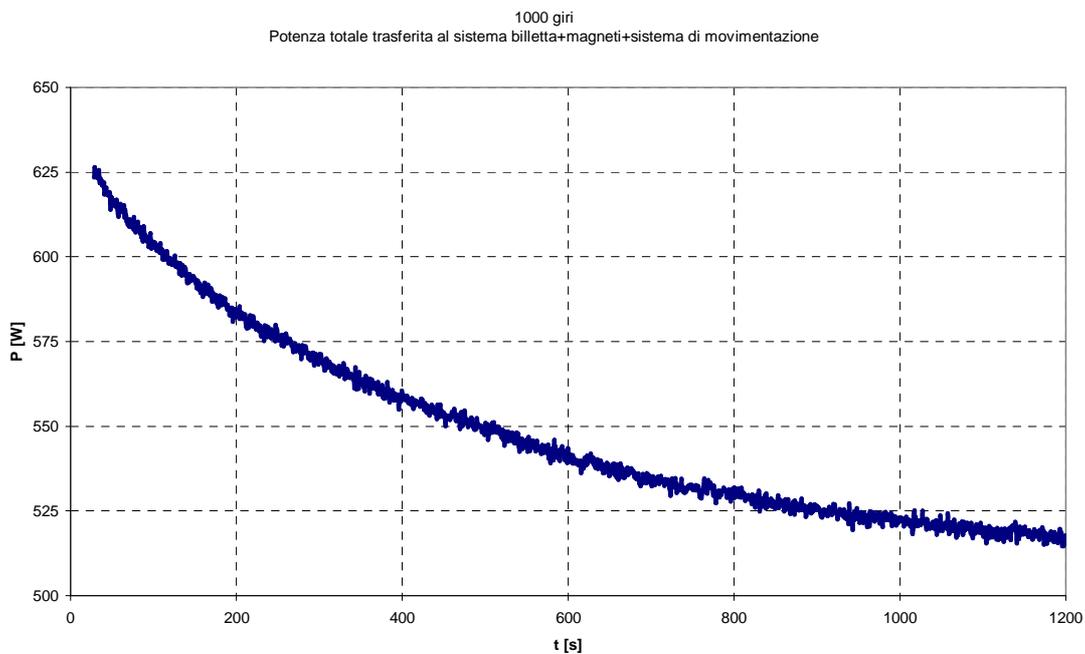


Figura 9.1 – Prova a 1000 giri: potenza totale misurata a monte del sistema.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

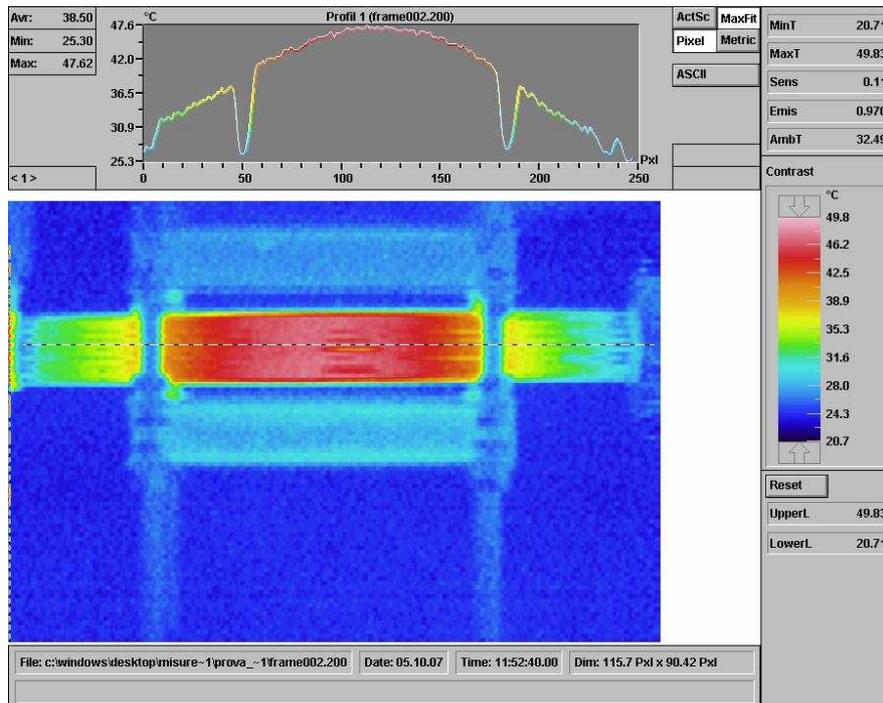


Figura 9.2 – Prova a 1000 giri: 1 minuto.

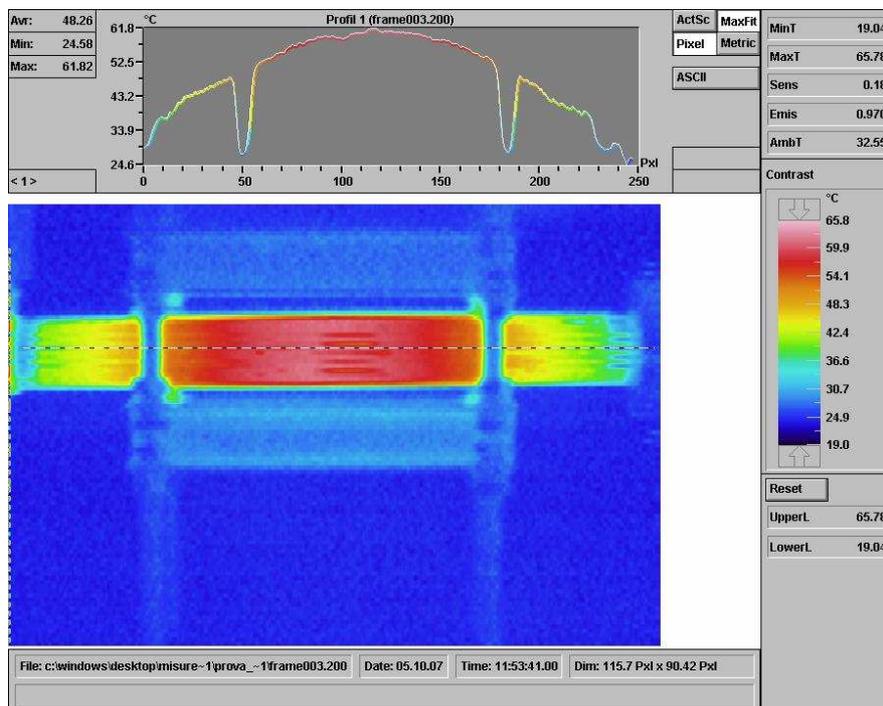


Figura 9.3 – Prova a 1000 giri: 2 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

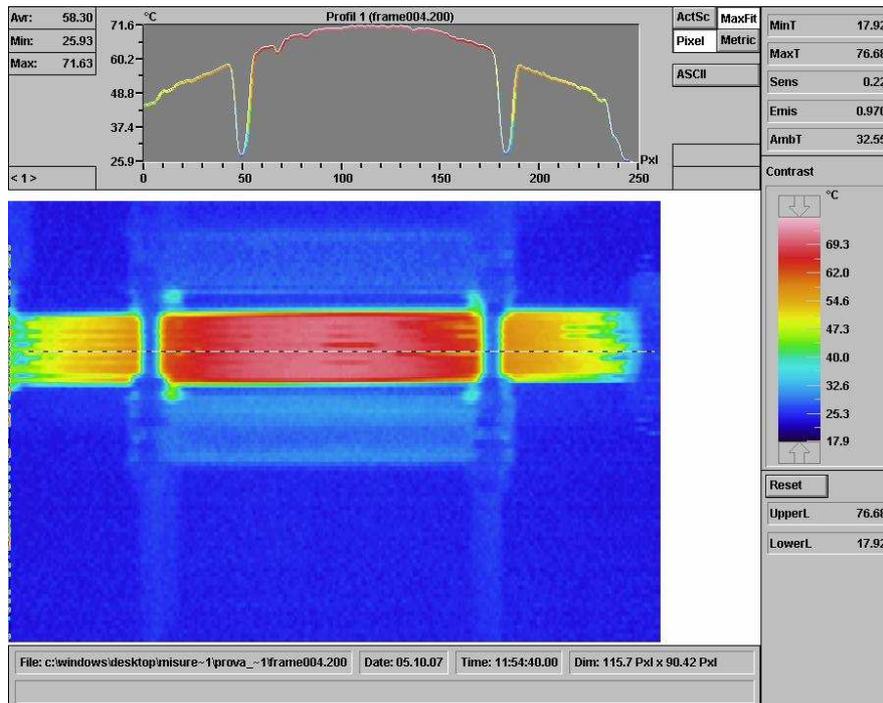


Figura 9.4 – Prova a 1000 giri: 3 minuti.

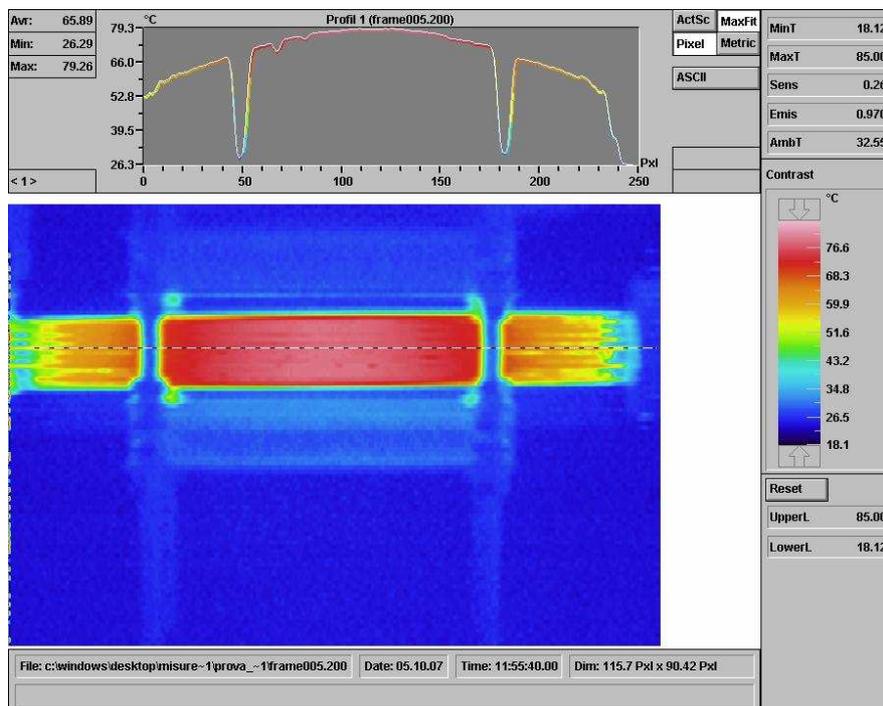


Figura 9.5 – Prova a 1000 giri: 4 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

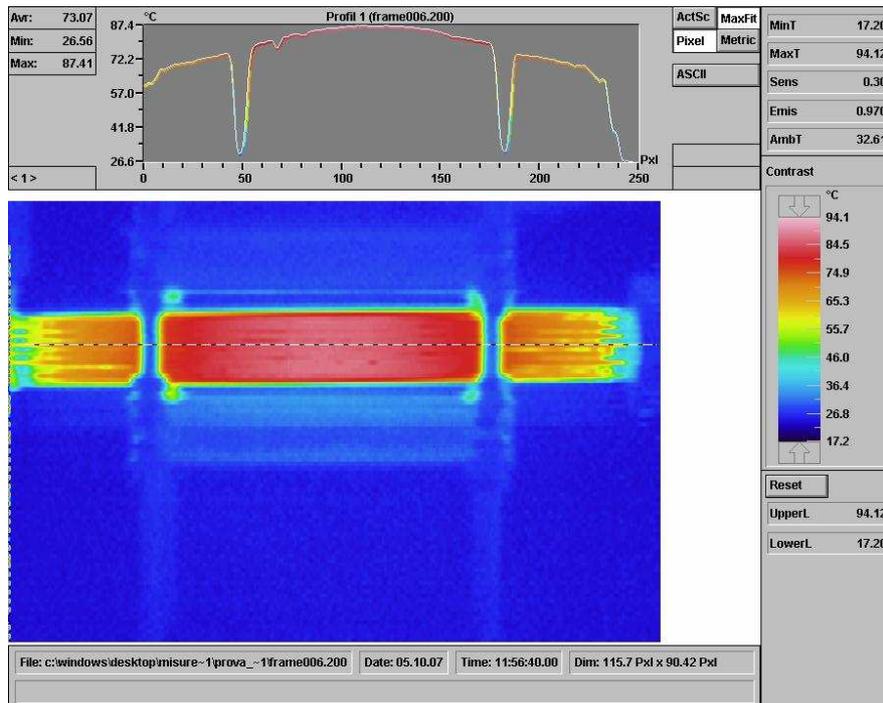


Figura 9.6– Prova a 1000 giri: 5 minuti.

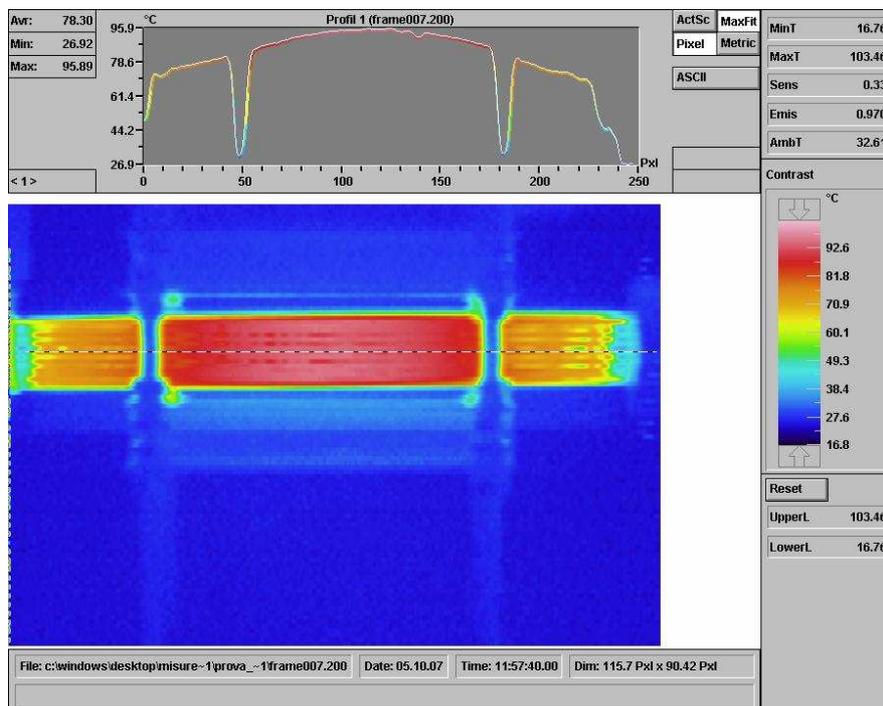


Figura 9.7 – Prova a 1000 giri: 6 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

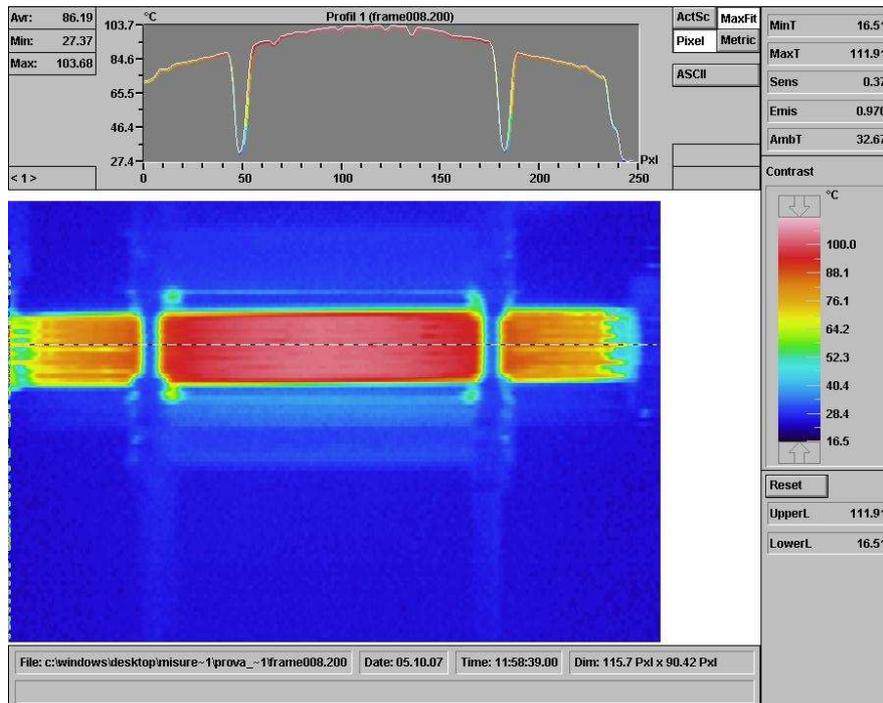


Figura 9.8 – Prova a 1000 giri: 7 minuti.

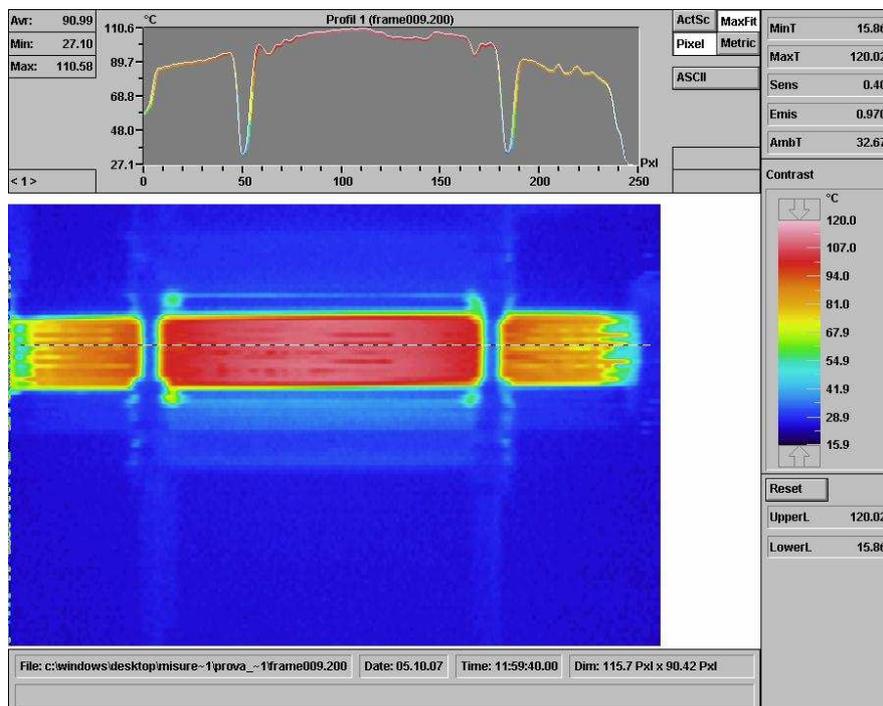


Figura 9.9 – Prova a 1000 giri: 8 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

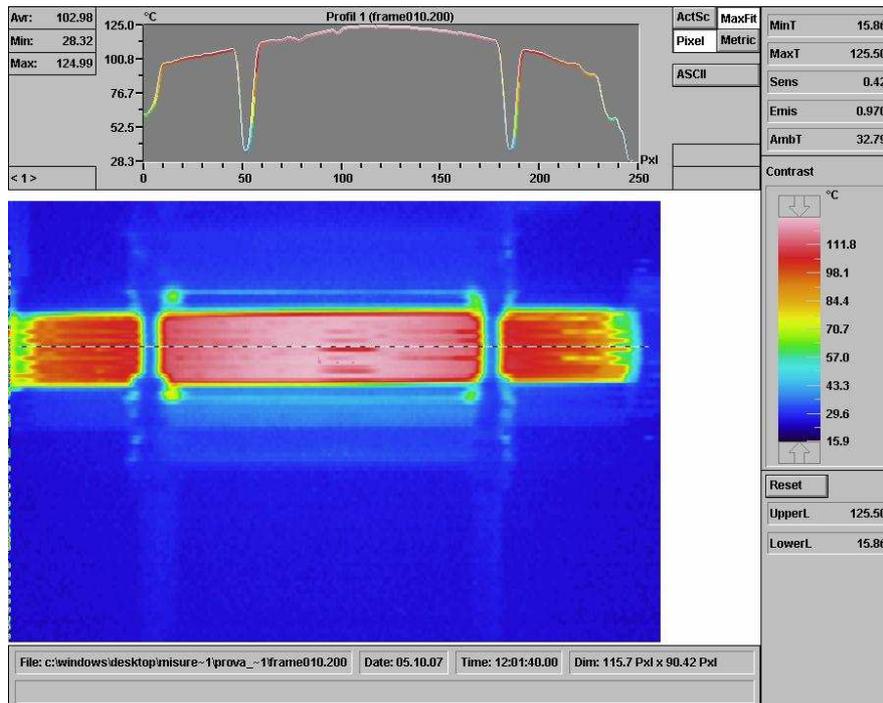


Figura 9.10 – Prova a 1000 giri: 10 minuti.

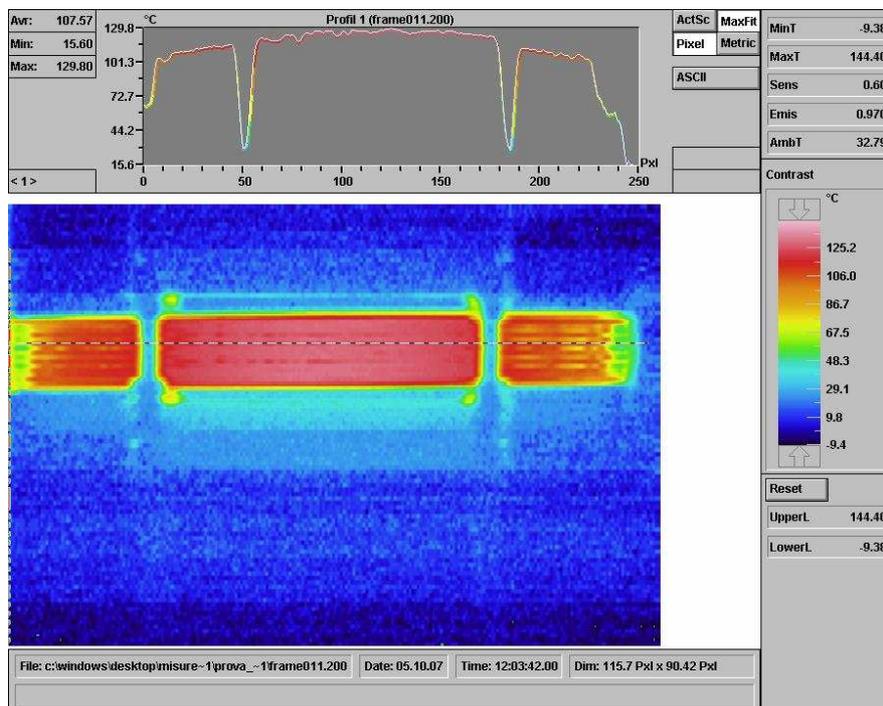


Figura 9.11 – Prova a 1000 giri: 12 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

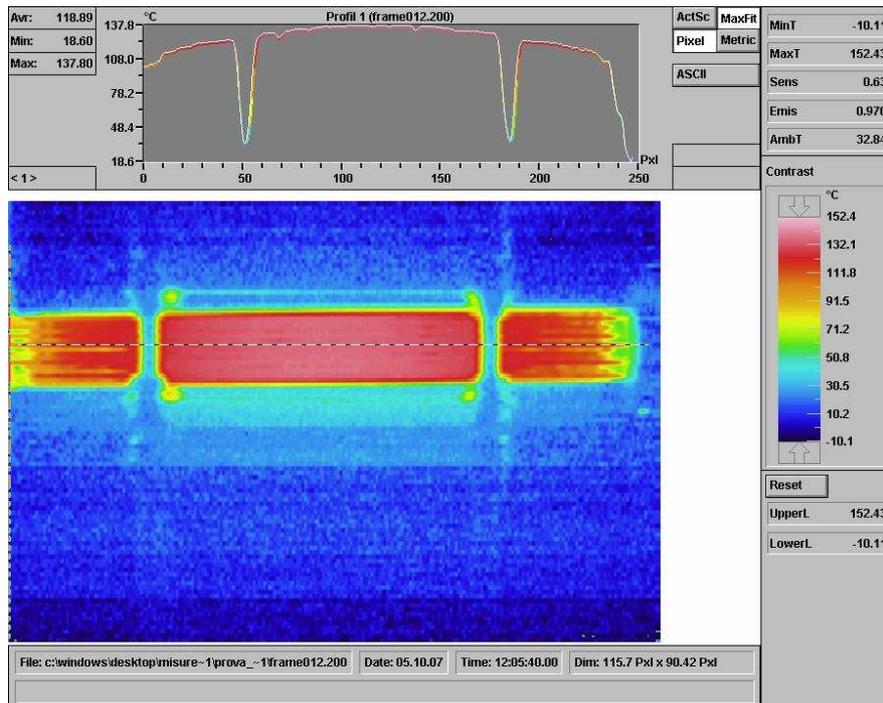


Figura 9.12 – Prova a 1000 giri: 14 minuti.

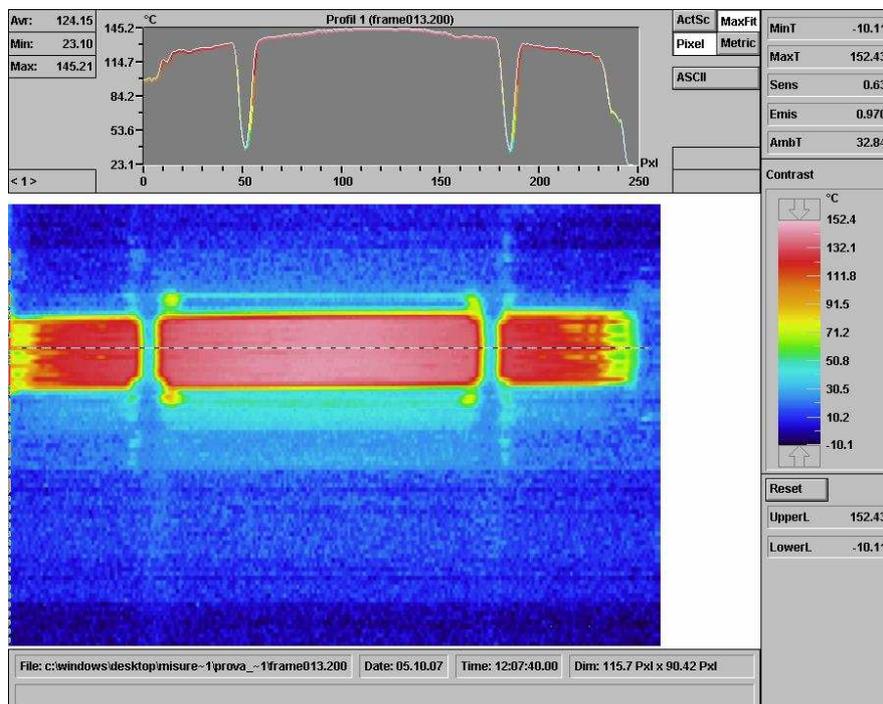


Figura 9.13 – Prova a 1000 giri: 16 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

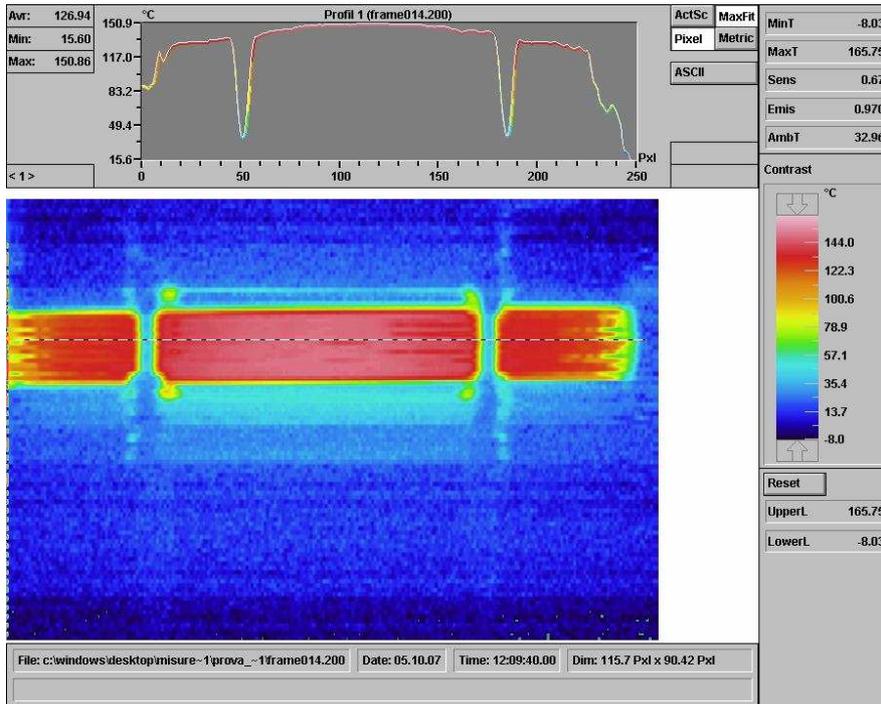


Figura 9.14 – Prova a 1000 giri: 18 minuti.

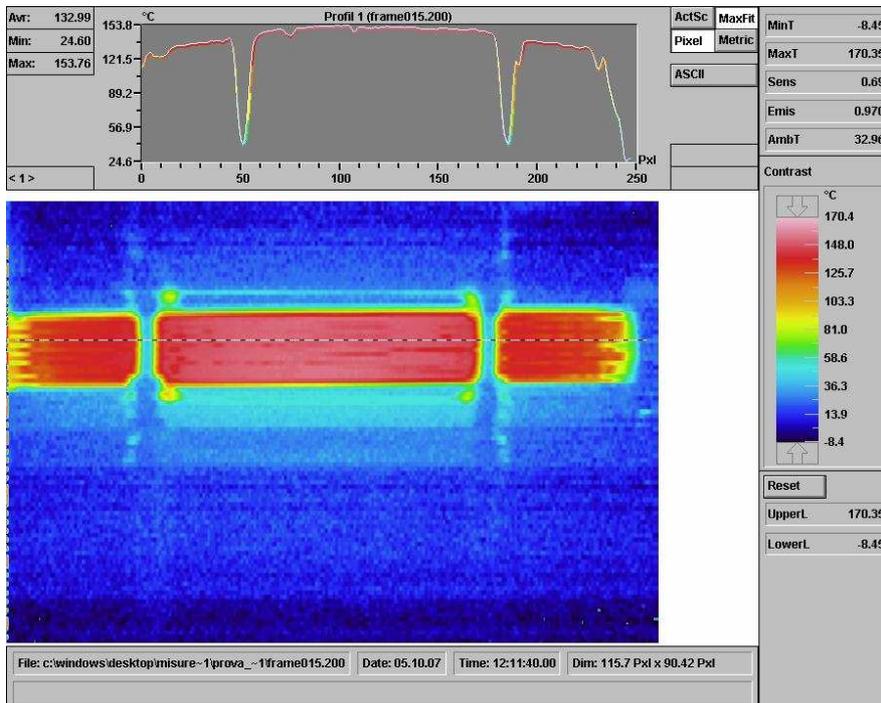


Figura 9.15 – Prova a 1000 giri: 20 minuti.

## 10. Appendice 3: dati sperimentali della prova a 2000 rpm

Strumentazione di misura: Wattmetro YOKOGAWA WT 230 collegato a monte dell'intero sistema rotante (Circuiti di controllo compresi). Thermocamera AVIO TVS 2000 MK-II.

Note: la fase iniziale (circa 10 secondi) in cui la velocità del motore deve raggiungere la condizione di regime, non è riportata nel grafico relativo all'andamento temporale della potenza assorbita. Termine della prova: condizione di regime termico della billetta.

La potenza totale misurata a vuoto (sistema rotante in assenza dei magneti) nella condizione di velocità di regime pari a 2000 giri/minuto risulta pari a 390 W.

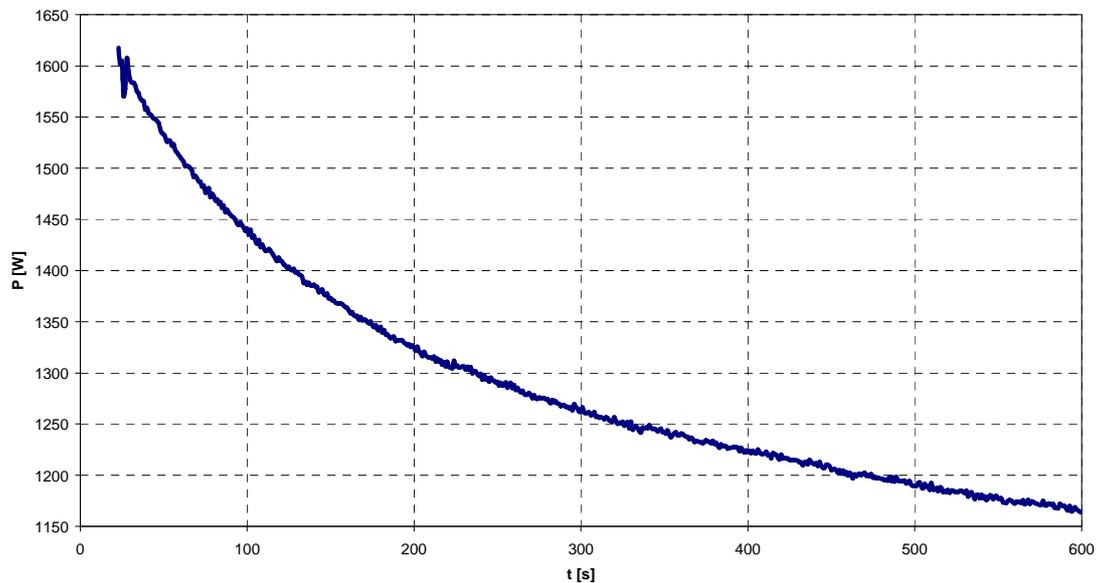


Figura 10.1 – Prova a 2000 giri: potenza totale misurata a monte del sistema.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

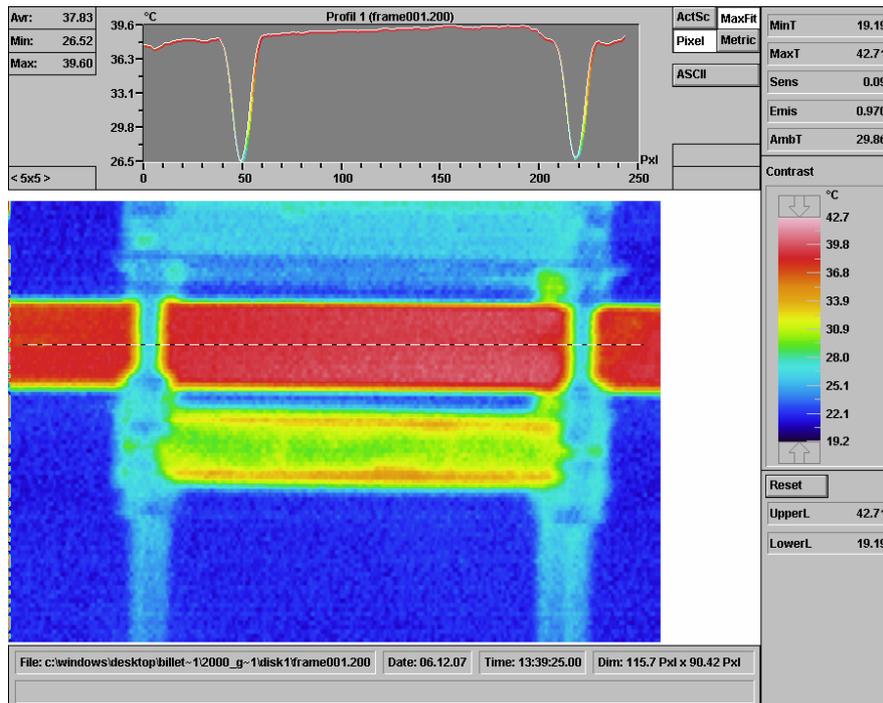


Figura 10.2 – Prova a 2000 giri: istante iniziale.

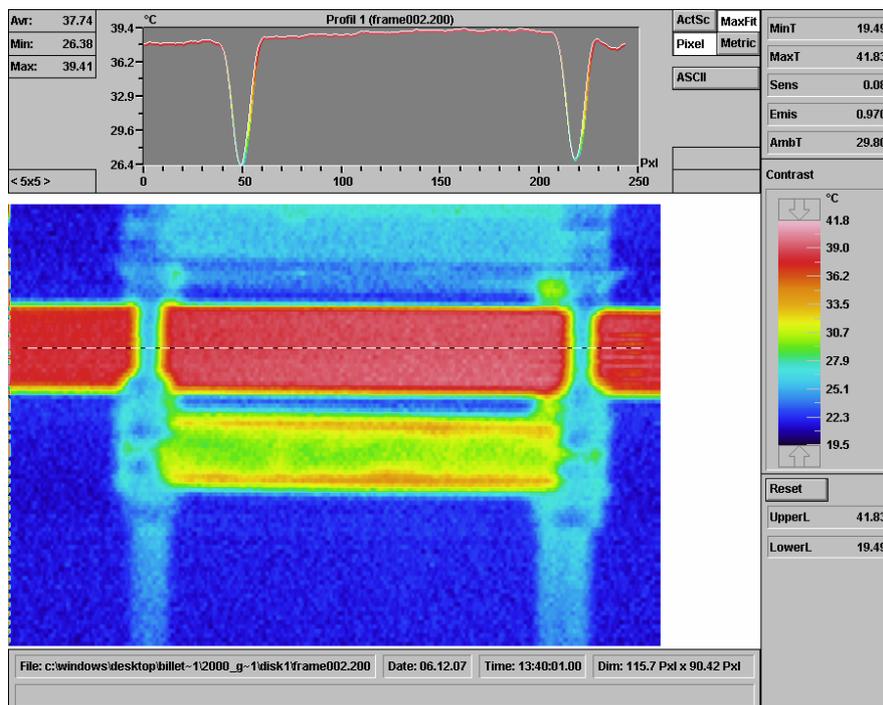


Figura 10.3 – Prova a 2000 giri: 1/2 minuto.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

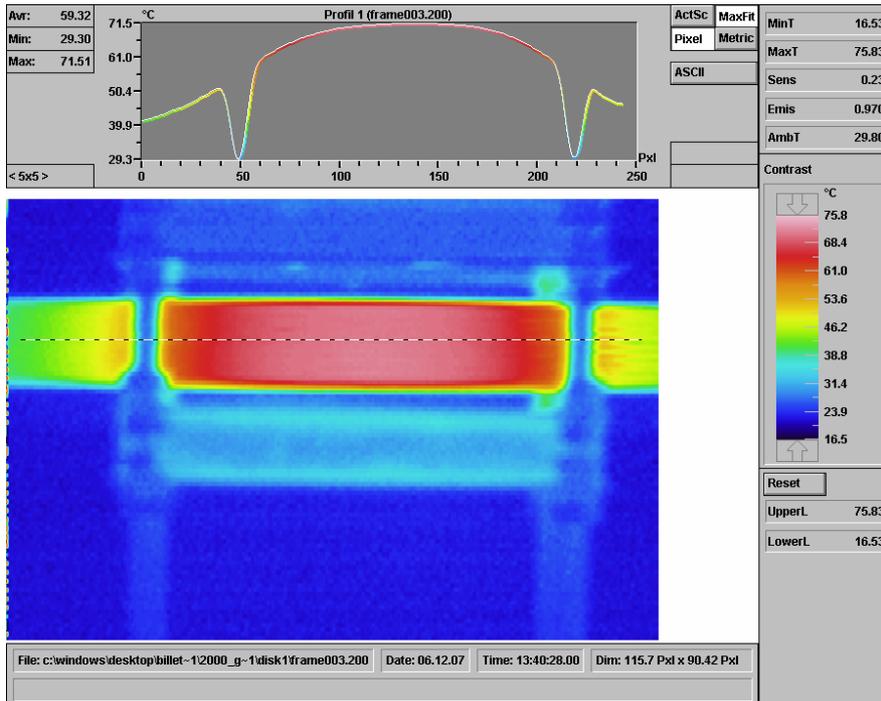


Figura 10.4 – Prova a 2000 giri: 1 minuto.

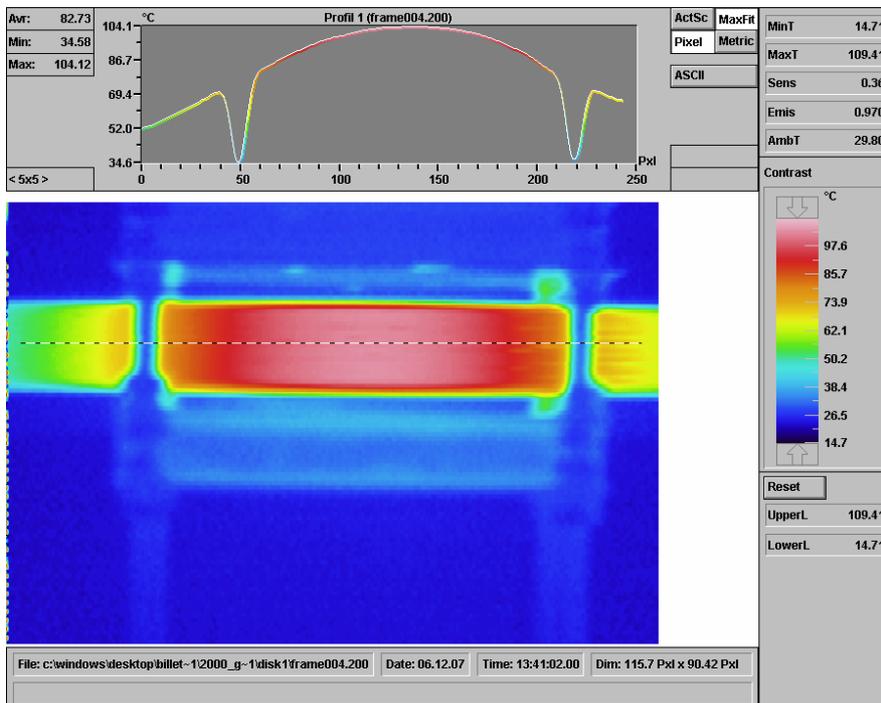


Figura 10.5 – Prova a 2000 giri: 1 minuto e 1/2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

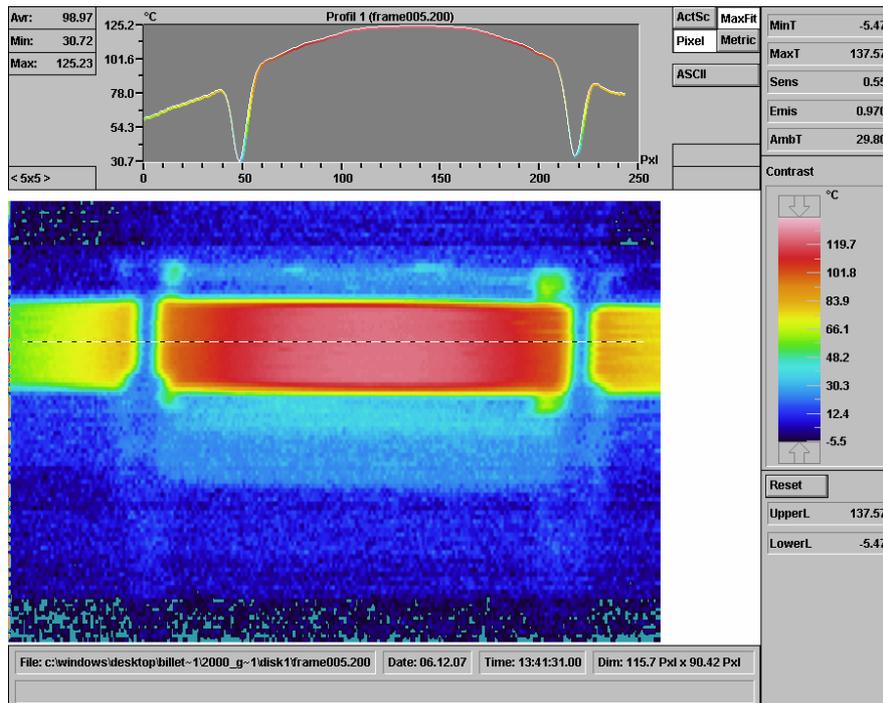


Figura 10.6 – Prova a 2000 giri: 2 minuti.

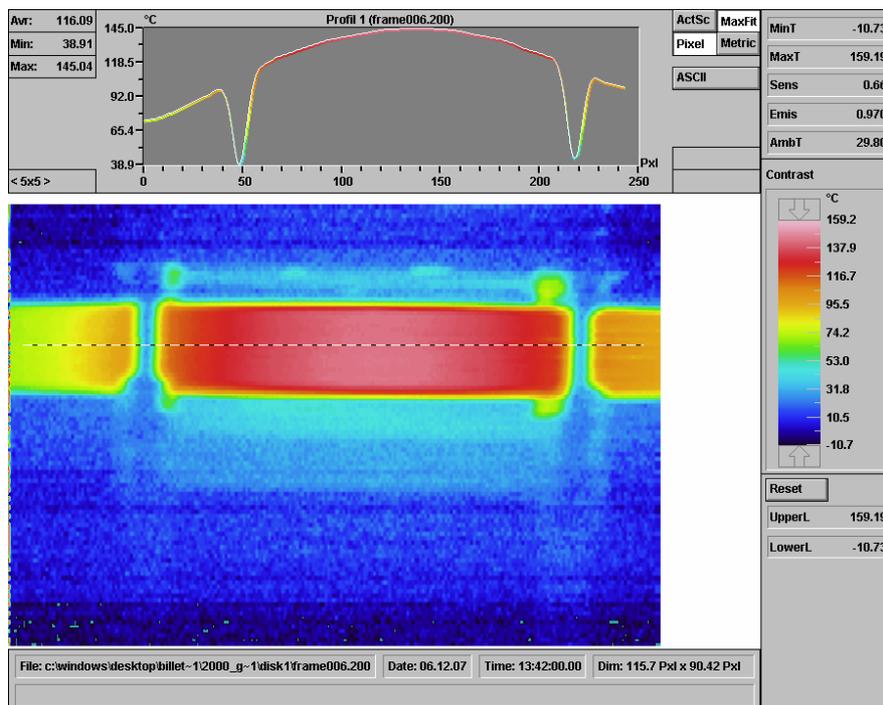


Figura 10.7 – Prova a 2000 giri: 2 minuti e 1/2.



Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

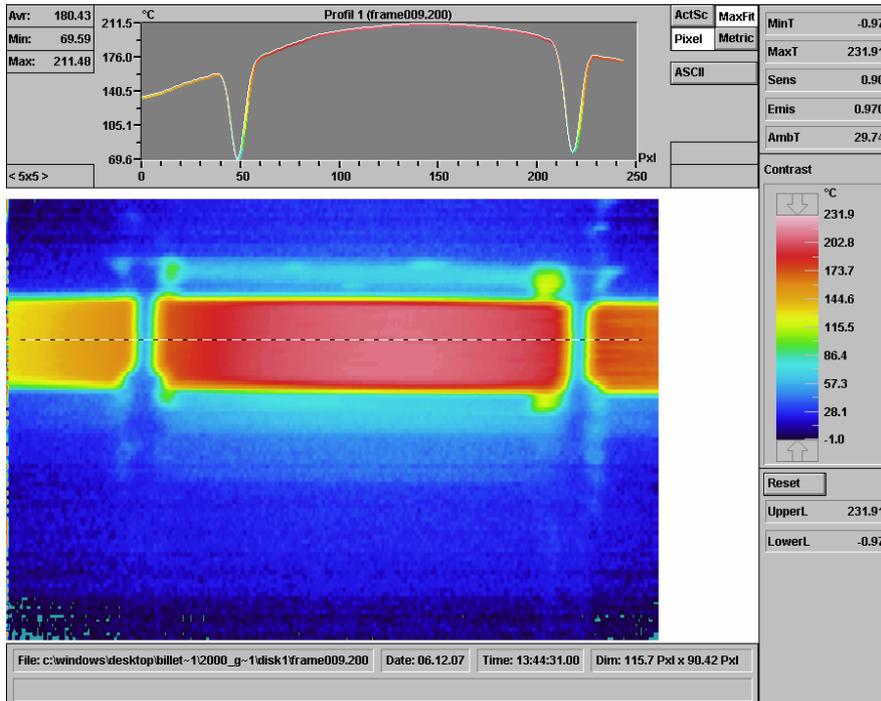


Figura 10.10 – Prova a 2000 giri: 5 minuti.

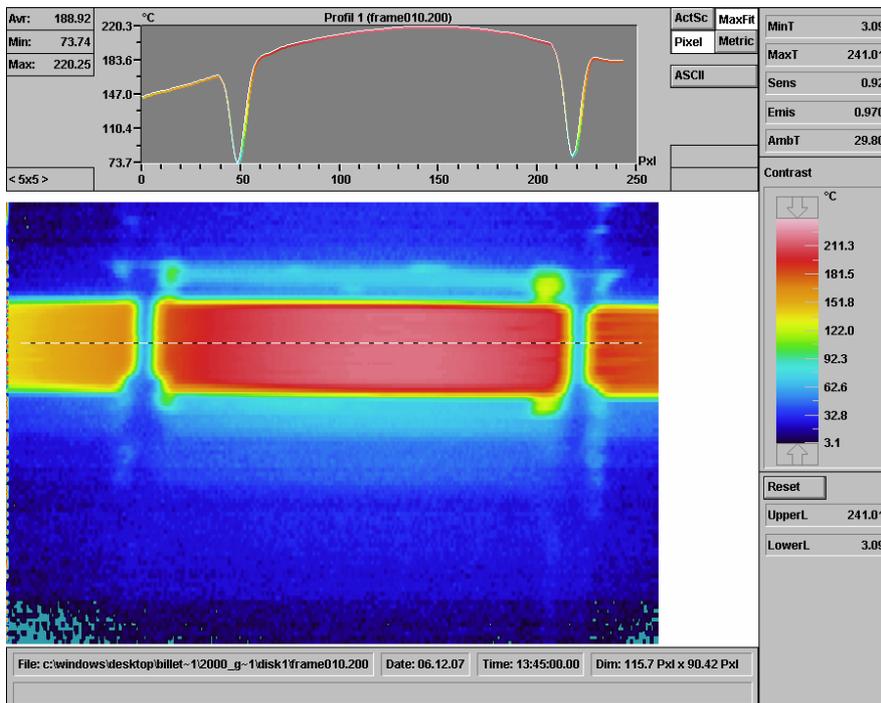


Figura 10.11 – Prova a 2000 giri: 5 minuti e 1/2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

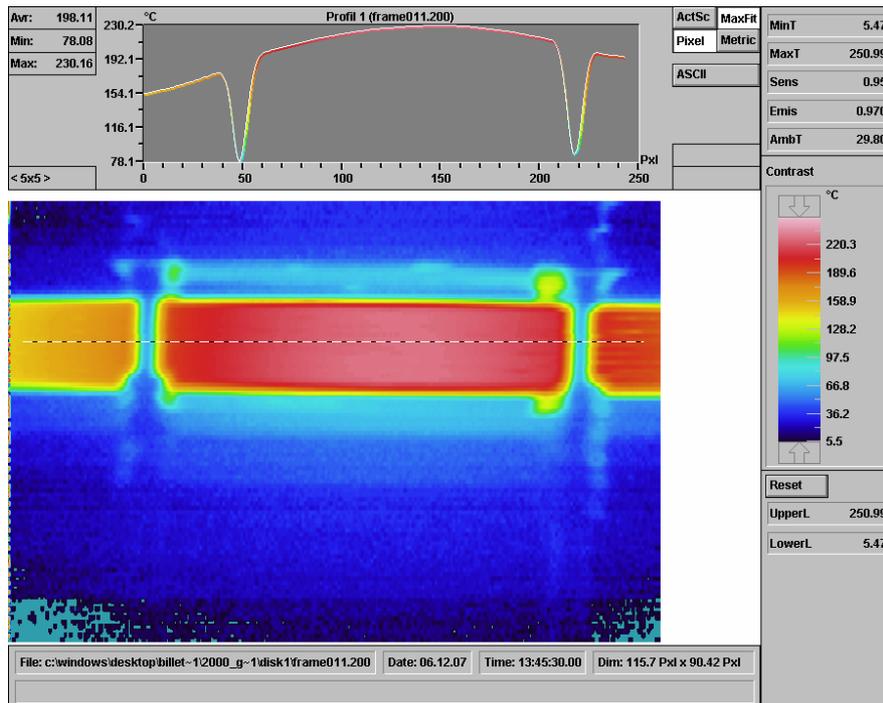


Figura 10.12 – Prova a 2000 giri: 6 minuti.

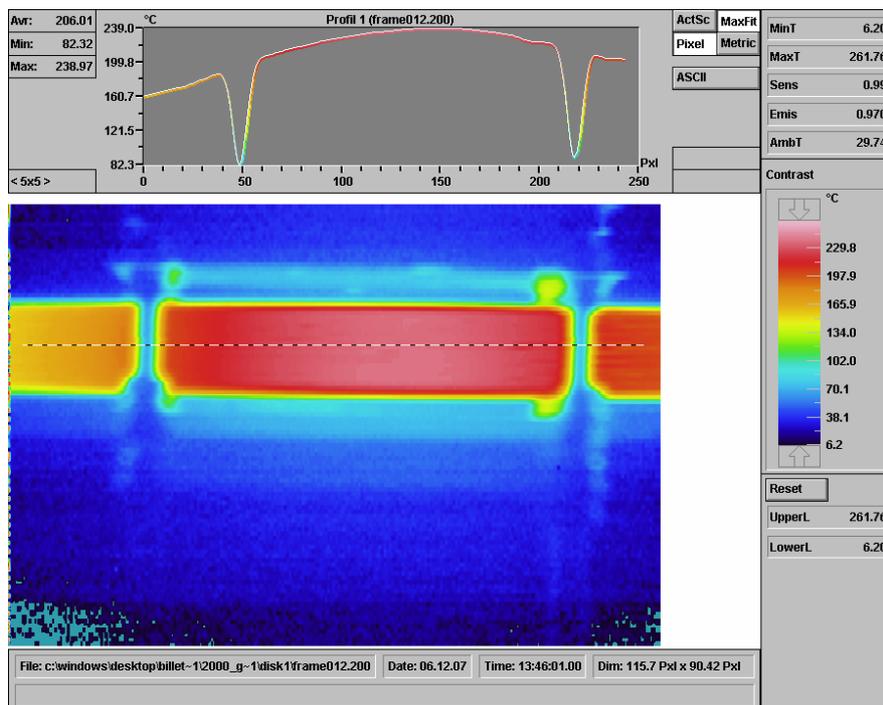


Figura 10.13 – Prova a 2000 giri: 6 minuti e 1/2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

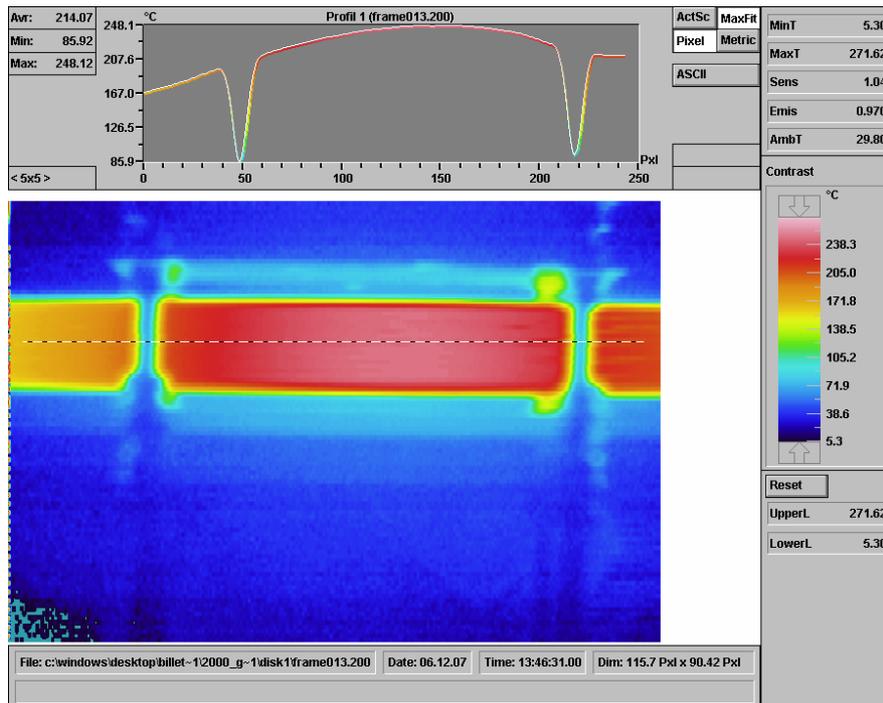


Figura 10.14 – Prova a 2000 giri: 7 minuti.

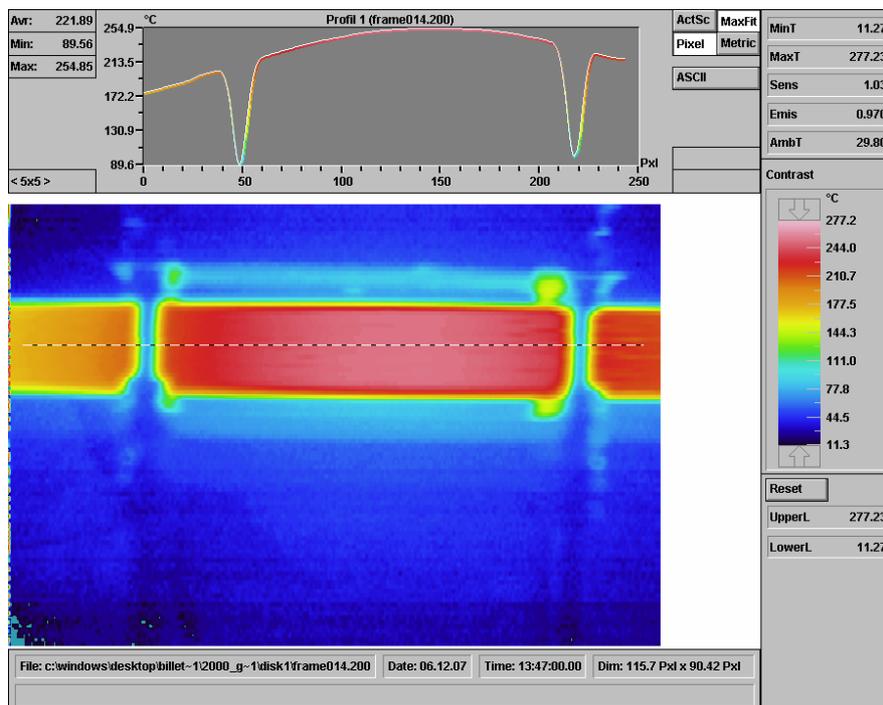


Figura 10.15 – Prova a 2000 giri: 7 minuti e 1/2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

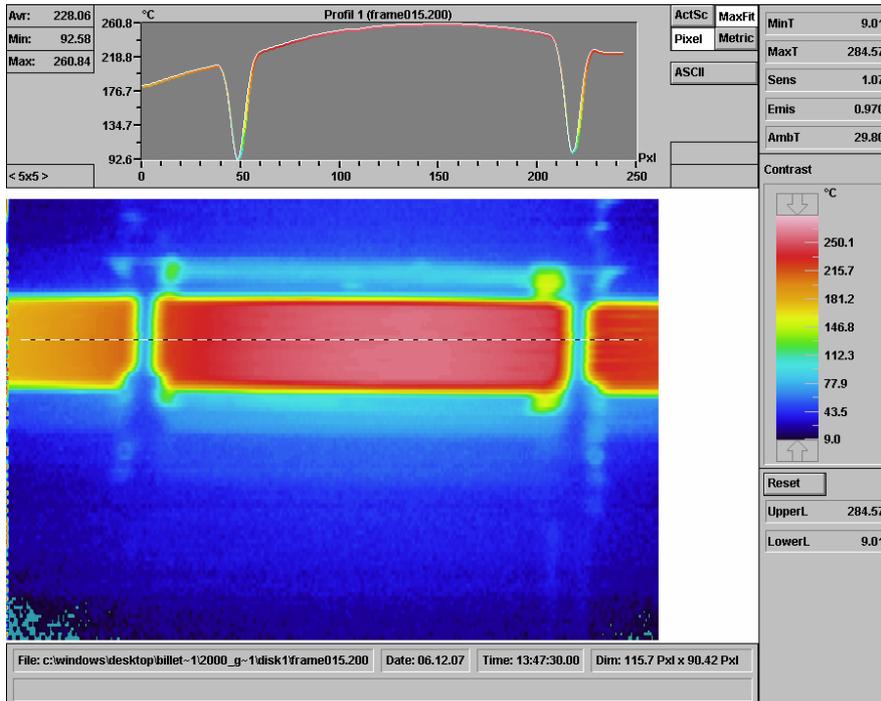


Figura 10.16 – Prova a 2000 giri: 8 minuti.

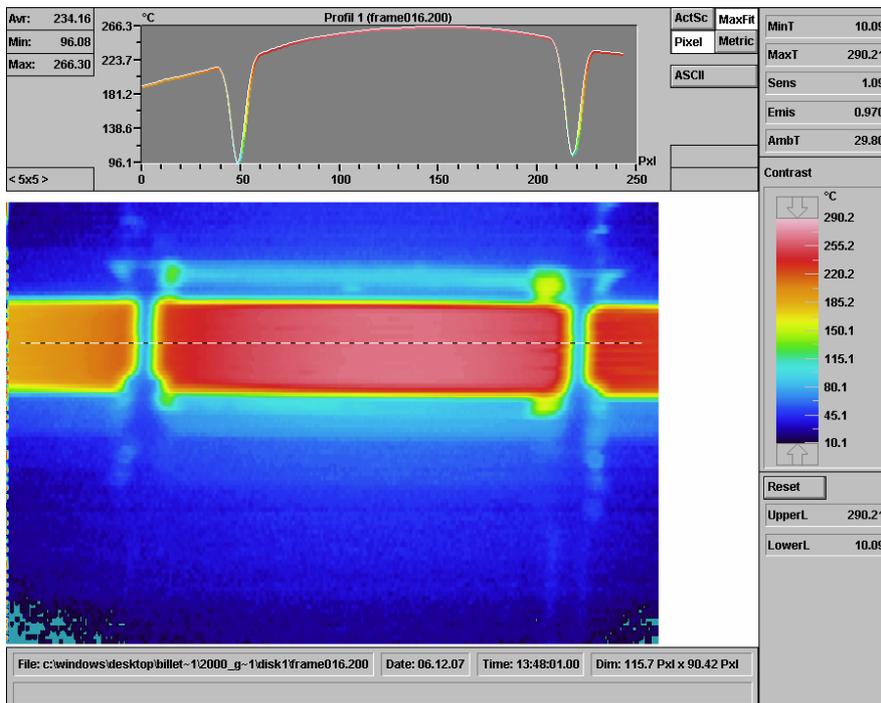


Figura 10.17 – Prova a 2000 giri: 8 minuti e 1/2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

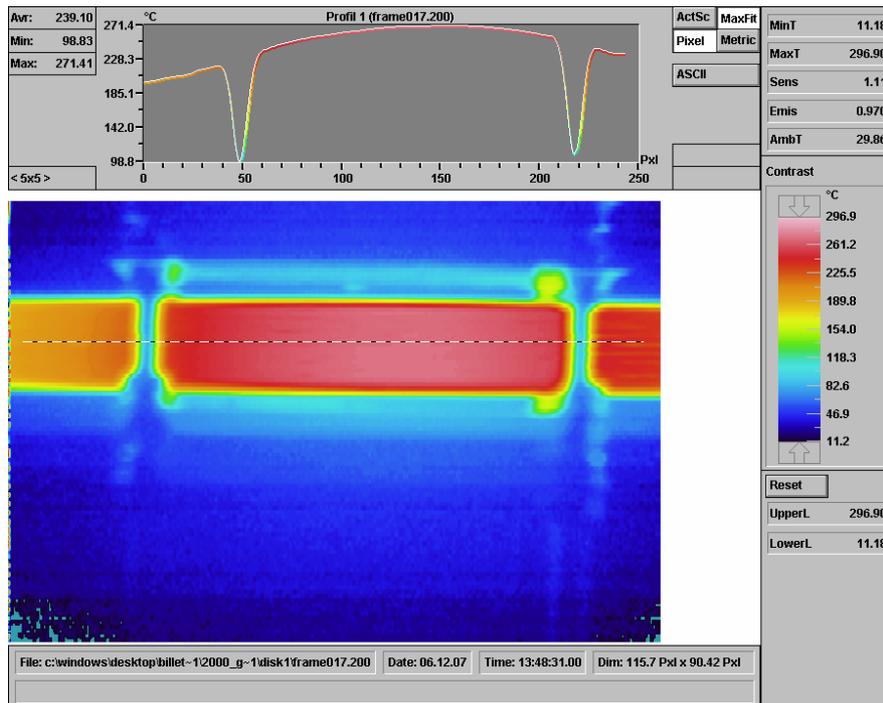


Figura 10.18 – Prova a 2000 giri: 9 minuti.

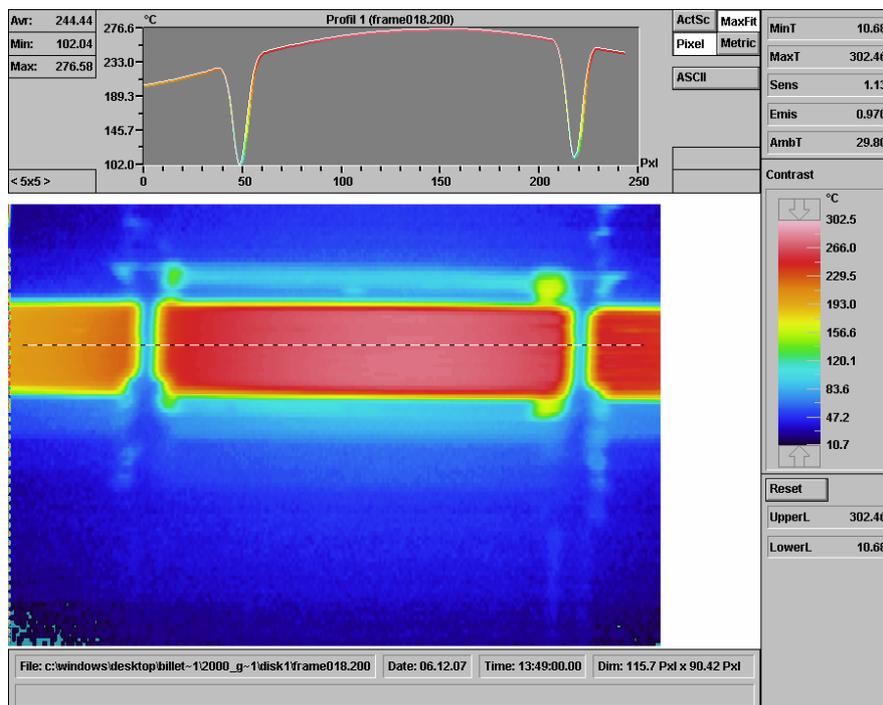


Figura 10.19 – Prova a 2000 giri: 9 minuti e 1/2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

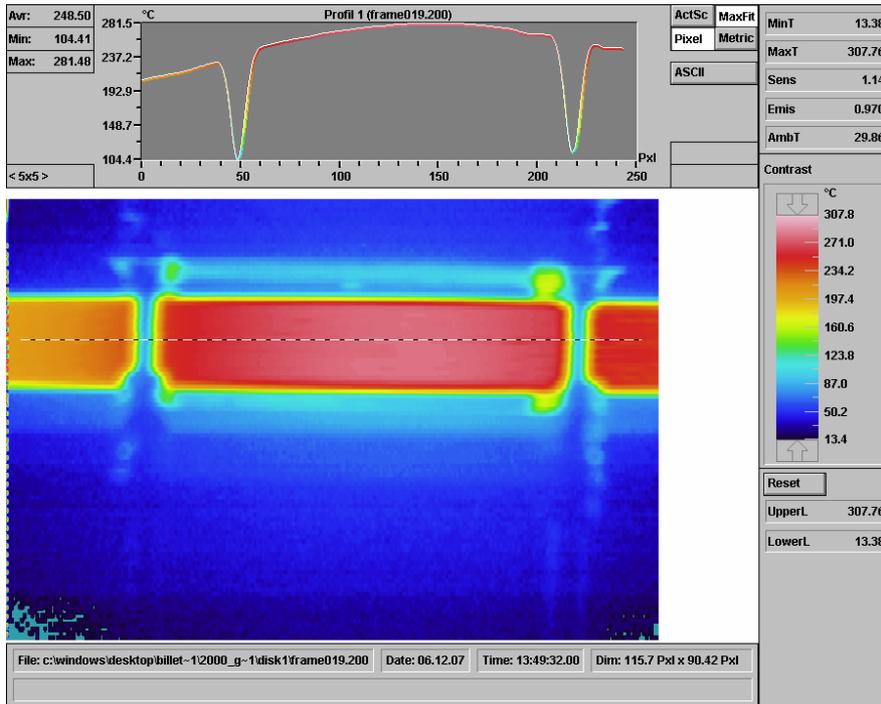


Figura 10.20 – Prova a 2000 giri: 10 minuti.

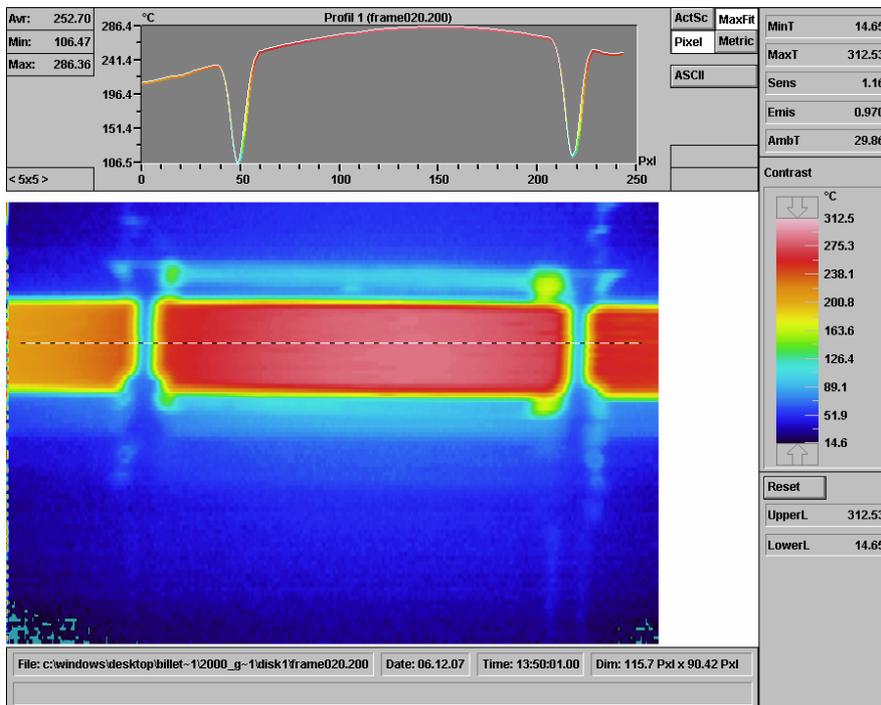


Figura 10.21 – Prova a 2000 giri: 10 minuti e 1/2.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

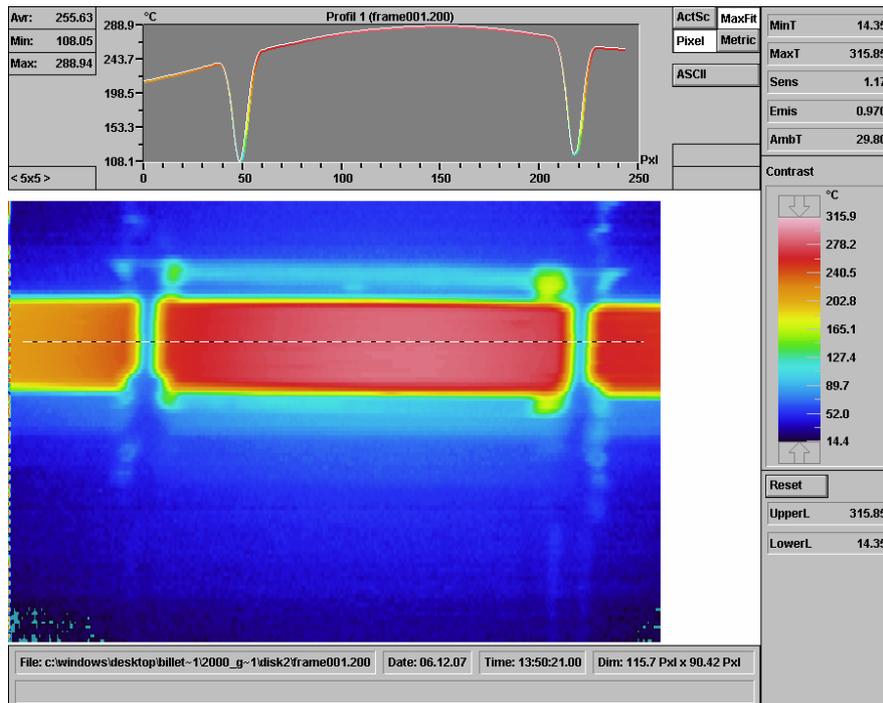


Figura 10.22 – Prova a 2000 giri: 11 minuti.

## 11. Appendice 4: dati sperimentali della prova a 3000 rpm

Strumentazione di misura: Wattmetro YOKOGAWA WT 230 collegato a monte dell'intero sistema rotante (Circuiti di controllo compresi). Thermocamera AVIO TVS 2000 MK-II.

Note: la fase iniziale (circa 10 secondi) in cui la velocità del motore deve raggiungere la condizione di regime, non è riportata nel grafico relativo all'andamento temporale della potenza assorbita. Termine della prova: condizione di regime termico della billetta.

La potenza totale misurata a vuoto (sistema rotante in assenza dei magneti) nella condizione di velocità di regime pari a 3000 giri/minuto risulta pari a 500 W.

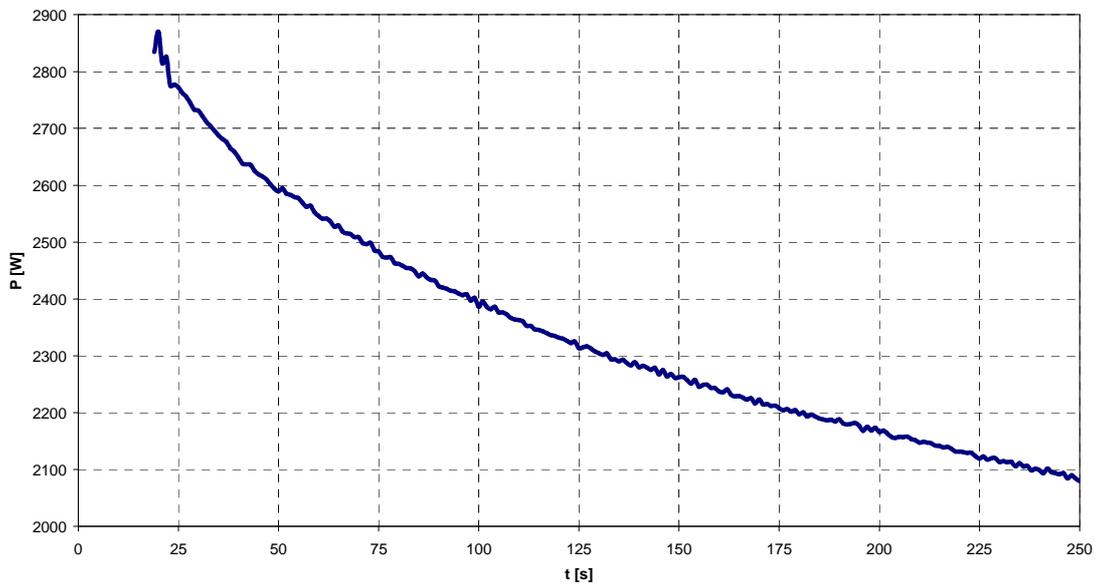


Figura 11.1 – Prova a 3000 giri: potenza totale misurata a monte del sistema.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

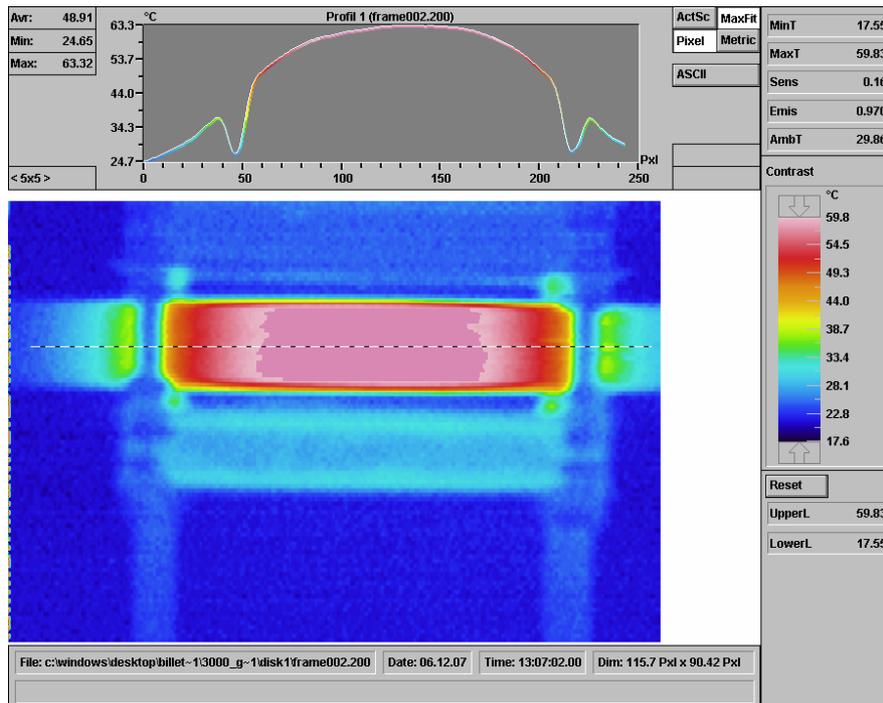


Figura 11.2 – Prova a 3000 giri: 1/2 minuto.

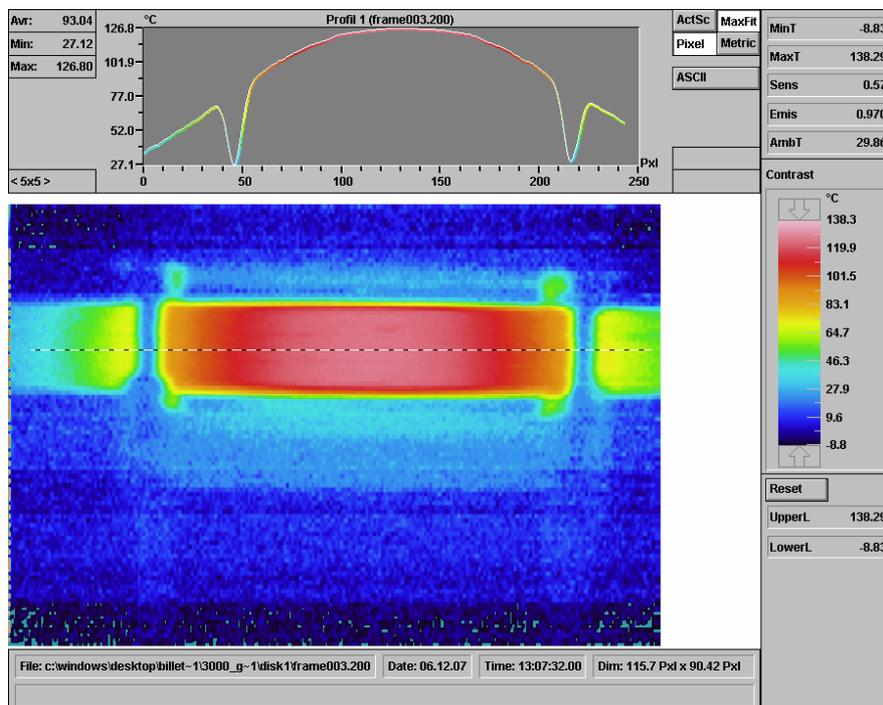


Figura 11.3 – Prova a 3000 giri: 1 minuto.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

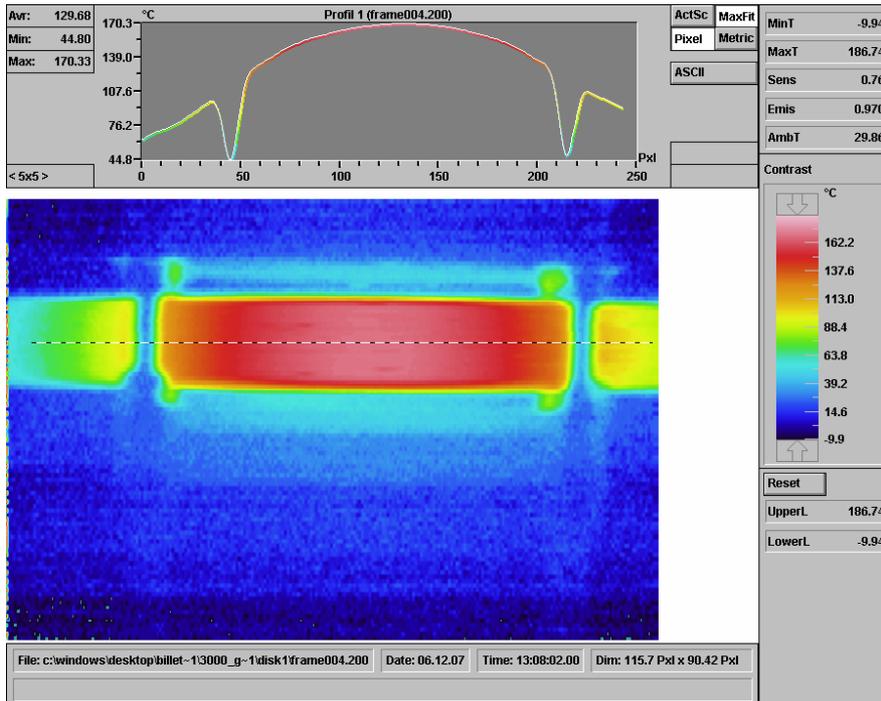


Figura 11.4 – Prova a 3000 giri: 1 minuto e 1/2.

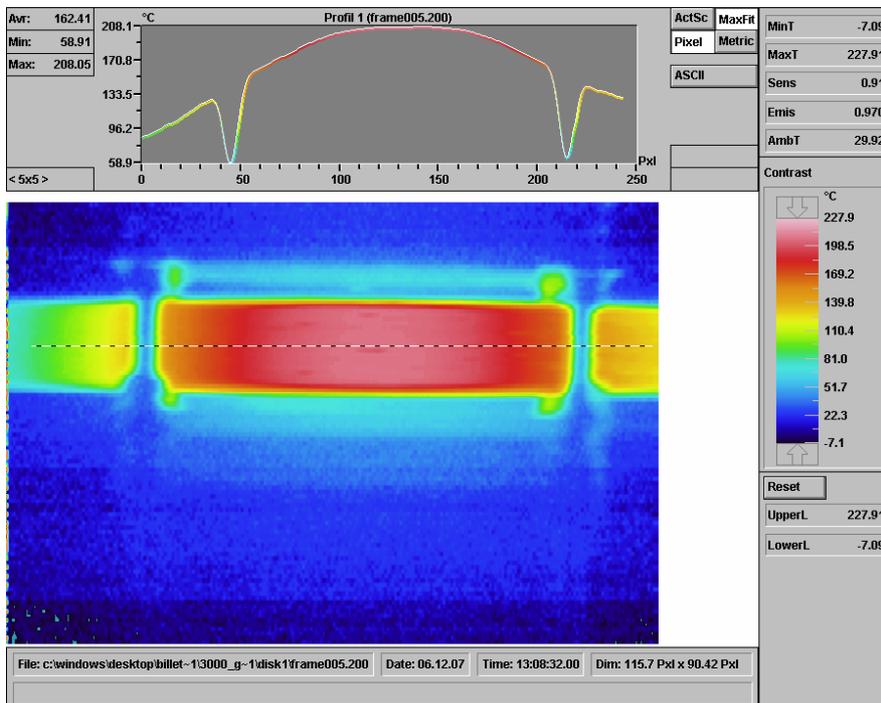


Figura 11.5 – Prova a 3000 giri: 2 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

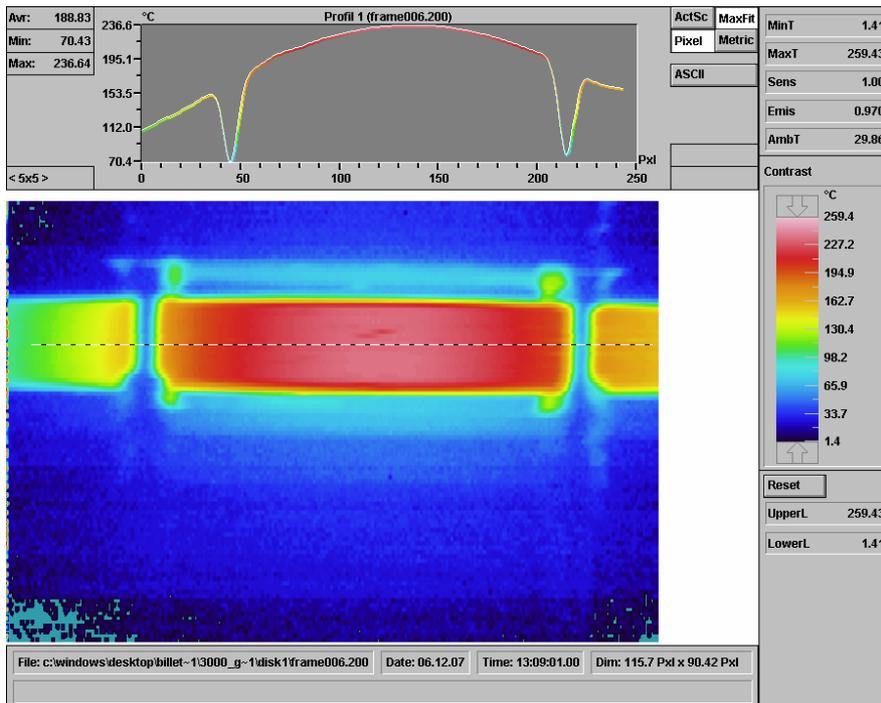


Figura 11.6 – Prova a 3000 giri: 2 minuti e 1/2.

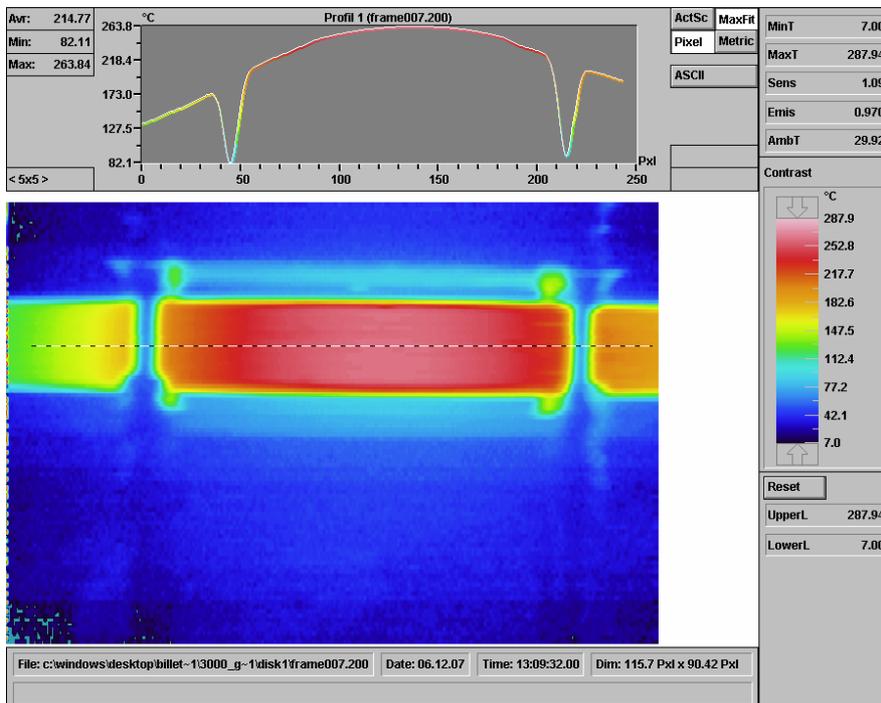


Figura 11.7 – Prova a 3000 giri: 3 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

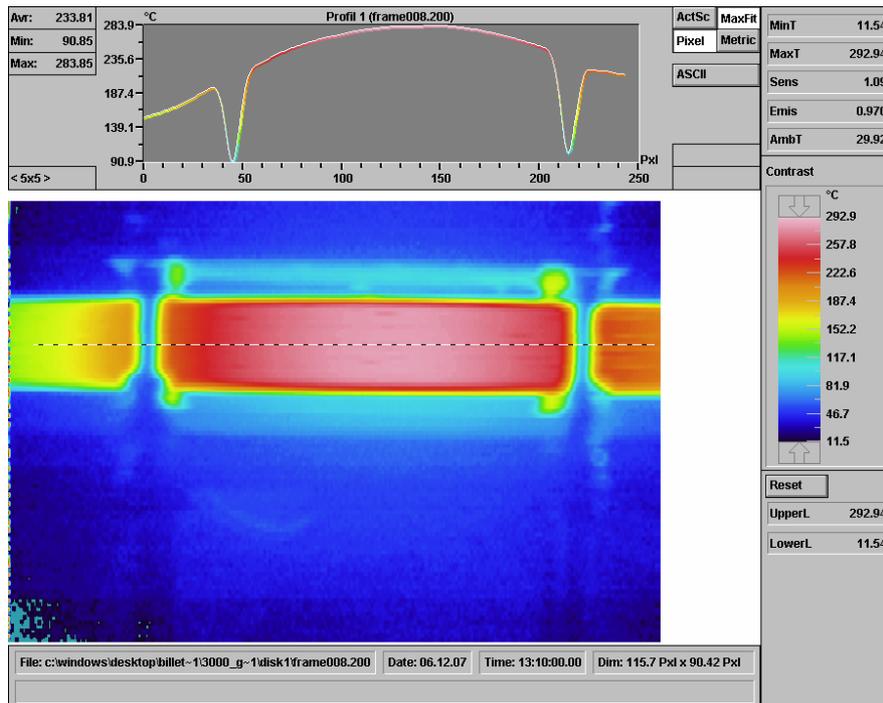


Figura 11.8 – Prova a 3000 giri: 3 minuti e 1/2.

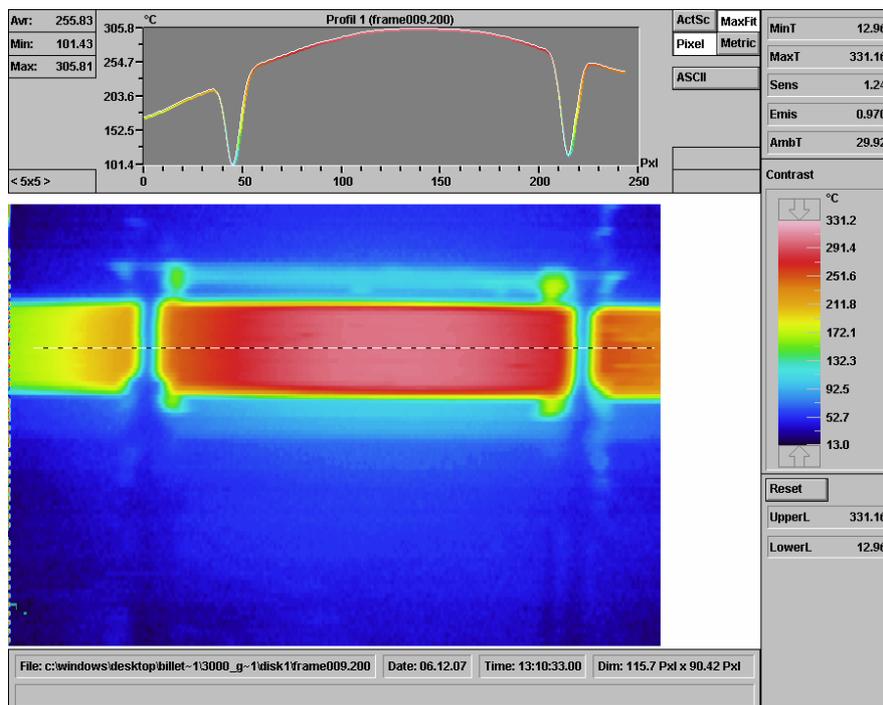


Figura 11.9 – Prova a 3000 giri: 4 minuti.

Sottoprogetto Unità di BOLOGNA

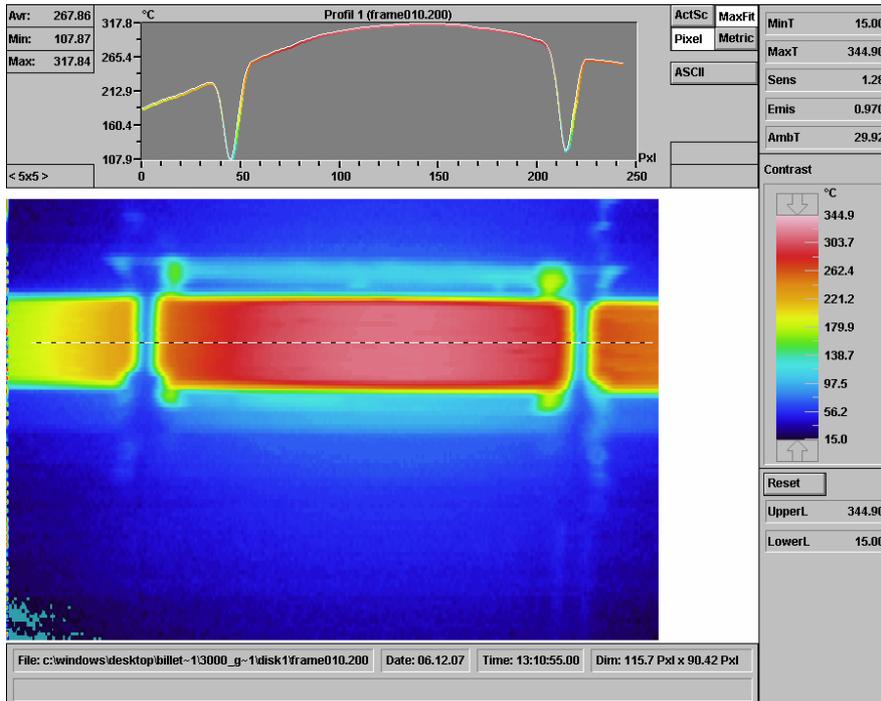


Figura 11.10 – Prova a 3000 giri: 4 minuti e 1/2.