



Ricerca di Sistema elettrico

## Progetto di un circuito per prove sperimentali su mini-mircocanali con S-CO<sub>2</sub>

G. Zummo, G. Boccardi, A. Franchi, A. Lattanzi, M. Morlacca,  
M. Pieve, A. Scotini, L. Simonetti, L. Saraceno, R. Trinchieri

PROGETTO DI UN CIRCUITO PER PROVE SPERIMENTALI SU MINI-MIRCOCANALI CON S-CO<sub>2</sub>.

G. Zummo, G. Boccardi, A. Franchi, A. Lattanzi, M. Morlacca, M. Pieve, A. Scotini, L. Simonetti, L. Saraceno, R. Trinchieri - ENEA

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Generazione di energia con basse emissioni di carbonio

Progetto: Polo tecnologico del Sulcis: Tecnologie e Metodologie "Low Carbon" e Edifici a Energia Quasi Zero (nZEB)

Obiettivo: parte A – a.2 – Cicli a CO<sub>2</sub> supercritica

Task: a2.2: Tecniche di raffreddamento di parti calde di turbogas a CO<sub>2</sub> supercritica

Responsabile del Progetto: F.R. Picchia, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 INTRODUZIONE ALLA REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI PRINCIPALI DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE .....	6
2.2 REALIZZAZIONE DEL RACK.....	8
2.3 GRUPPO POMPA - COOLER .....	10
2.4 PRE-HEATER.....	12
2.5 SEZIONE DI PROVA.....	13
2.6 PROGETTO ELETTRICO DI MASSIMA PER I LAVORI ELETTRICI DEL SITO OVE VERRÀ INSTALLATO L'IMPIANTO SPERIMENTALE .....	16
3 CONCLUSIONI.....	19
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	20
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	20

## Sommario

Questo rapporto descrive le attività svolte dal laboratorio ENEA (DTE-PCU-SPCT) riguardanti la realizzazione dei componenti principali e delle infrastrutture necessarie all'attività stessa di un circuito sperimentale per lo studio della trasmissione del calore della CO<sub>2</sub> in condizioni supercritiche.

L'impianto sperimentale, denominato CO<sub>2</sub>ATTO (CO<sub>2</sub> Apparatus for Thermal Test Optimization) è stato progettato per effettuare misure di scambio termico della CO<sub>2</sub> in condizioni supercritiche e nelle regioni limitrofe del punto critico. La geometria dei condotti in cui misurare lo scambio termico sarà di tipo tubolare con diametri idraulici tipici delle geometrie delle palettature di turbina. I diametri previsti sono nell'intervallo 0.5 mm e 4.0 mm. Il campo di temperatura previsto per le prove sperimentali va da 30 a 300 °C, con portata massica fino a 11 kg/h e pressioni fino a 130 bar.

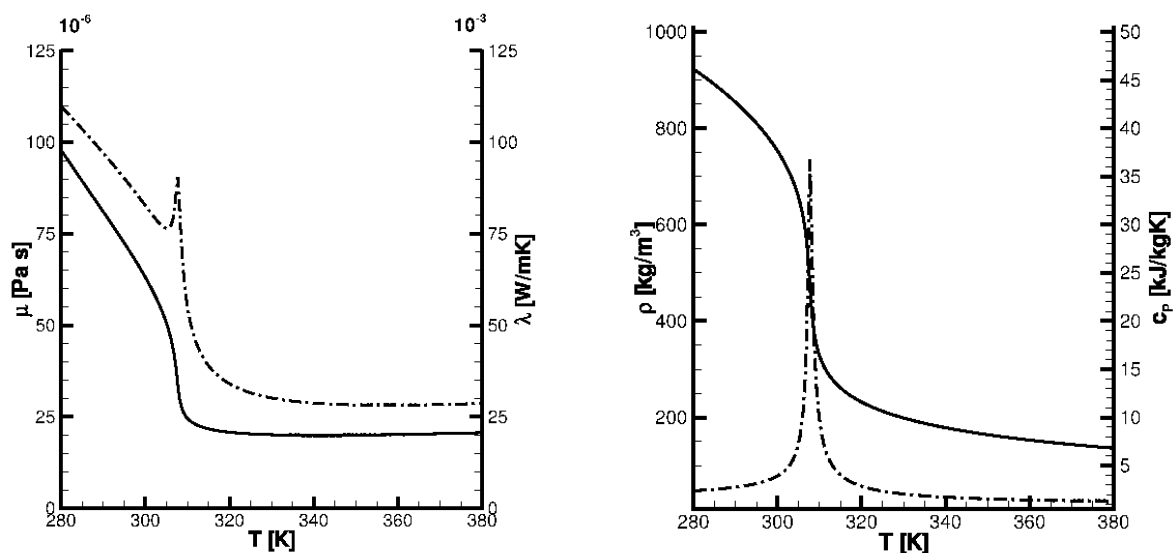
Le attività svolte hanno riguardato:

- la realizzazione del rack;
- l'assemblaggio e realizzazione delle principali parti del circuito sperimentale (blocco CO<sub>2</sub> pump – Cooler, cooler e pre-heater);
- la realizzazione e i test di verifica di una sezione di prova con un metodo innovativo basato su stampa 3D;
- l'individuazione dell'area in cui verrà installato l'impianto sperimentale;
- la redazione del progetto di massima per i lavori elettrici dell'area prescelta.

## 1 Introduzione

Recentemente, il mondo scientifico ha registrato un crescente interesse per i sistemi a CO<sub>2</sub> supercritica per la produzione di energia utilizzando diverse potenziali fonti di calore, tra cui solare, geotermico, combustibili fossili, biocarburanti e nucleare. Questi sistemi di produzione di energia elettrica si basano sul ciclo di potenza di tipo Brayton e utilizzano la CO<sub>2</sub> come fluido termovettore, ottenendo sensibili miglioramenti nella conversione di energia termica in energia meccanica, rispetto i tradizionali cicli a vapore. Oltre a questi vantaggi termodinamici, le macchine a CO<sub>2</sub> risultano essere più compatte, più semplici e forniscono risposte rapide nei transitori [1].

La CO<sub>2</sub> rappresenta un ottimo fluido termovettore per l'utilizzo nei cicli di potenza [2] grazie al moderato valore della pressione critica (7.38 Mpa), al basso valore della temperatura critica (30.98°C), la stabilità soprattutto alle alte temperature, la sua non tossicità e la disponibilità a basso costo. Inoltre, la CO<sub>2</sub> consente di ottenere elevati coefficienti di scambio termico nella regione del punto critico, grazie agli elevati valori della conducibilità termica, della densità e del calore specifico [2] (si veda la Fig. 1.1 per l'andamento delle proprietà fisiche della CO<sub>2</sub>). Oltre queste interessanti proprietà termofisiche, la CO<sub>2</sub> è caratterizzata da una bassa viscosità che consente di muovere il fluido con potenze di pompaggio alquanto ridotte.



**Figura 1.1. Proprietà termofisiche della CO<sub>2</sub>. Sinistra: andamento della viscosità cinematica  $\mu$  (linea continua) e della conducibilità termica  $\lambda$  (linea tratto e punto). Destra: andamento della densità  $\rho$  (linea continua) e del calore specifico a pressione costante  $c_p$  (linea tratto e punto)**

Nella regione supercritica è molto importante ottenere un'adeguata conoscenza delle caratteristiche di scambio termico della CO<sub>2</sub> in convezione forzata per sviluppare metodi e modelli di calcolo dei coefficienti di scambio termico per dimensionare correttamente gli scambiatori di calore. I pochi modelli attualmente disponibili in letteratura devono essere verificati nelle condizioni sperimentali e per tubi di piccolo diametro. Il campo di temperatura previsto per le prove sperimentali va da 30 a 300 °C. Le prove nell'intorno della temperatura critica, pari a 31 °C, consentiranno lo studio dei coefficienti di scambio termico in presenza di significative variazioni delle proprietà termofisiche della CO<sub>2</sub> tipiche di questa regione.

L'interesse dello studio sperimentale della trasmissione di calore in questo intervallo di temperature è dovuto al fatto che il coefficiente di scambio termico in convezione forzata dipende significativamente proprio dalla densità, dalla conducibilità termica, dalla viscosità e dalla capacità termica del fluido. Se consideriamo, infatti, la correlazione di scambio termico più nota per i tubi in moto turbolento abbiamo:

- Dittus Boelter [3]:

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (\text{eq. 1})$$

dove

$n=0.4$  (riscaldamento del fluido,  $T_{\text{parete}} > T_{\text{bulk}}$ )

$n=0.3$  (raffreddamento del fluido,  $T_{\text{parete}} < T_{\text{bulk}}$ )

I raggruppamenti adimensionali Nu, Re e Pr sono rispettivamente i noti numeri di Nusselt, di Reynolds e di Prandtl, definiti come

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad Re = \frac{Dv}{\nu} \quad Pr = \frac{c_p \rho \nu}{k}$$

dove compaiono appunto le grandezze termofisiche suddette. E' quindi evidente che le notevoli variazioni di queste grandezze, evidenziate nei grafici della Fig. 1.1, comportino importanti effetti sul valore del coefficiente di scambio termico h nonché di altri parametri utili per il dimensionamento, in particolare viscosità e densità.

Dall'analisi dei pochi lavori sperimentali di scambio termico della CO<sub>2</sub>, si può concludere che i modelli di scambio termico sviluppati in condizioni lontane dal punto critico, non forniscono risultati soddisfacenti per le condizioni della regione critica e le regioni limitrofe. Pertanto è necessario compiere un'adeguata campagna sperimentale per misurare i coefficienti di scambio termico e, successivamente, effettuare una approfondita analisi dei modelli di scambio termico esistenti per verificarne l'affidabilità.

Per un approfondimento delle variazioni del coefficiente di scambio termico nella regione critica della CO<sub>2</sub> si rimanda al [2].

L'obiettivo di questa attività prevede la realizzazione dei componenti principali dell'impianto sperimentale, denominato CO<sub>2</sub>ATTO (CO<sub>2</sub> Apparatus for Thermal Test Optimization) e delle infrastrutture necessarie per lo svolgimento della sperimentazione. Il circuito sperimentale consentirà di misurare i coefficienti di scambio termico della CO<sub>2</sub> in condizioni supercritiche e nelle regioni limitrofe al punto critico. La geometria dei condotti, in cui verrà misurato lo scambio termico, sarà di tipo tubolare con diametri idraulici tipici delle geometrie di una palettatura di turbina. I diametri previsti sono nell'intervallo 0.5 mm e 4.0 mm.

Il campo di temperatura previsto per le prove sperimentali va da 30 a 300 °C, con portata massica fino a 11 kg/h e pressioni fino a 130 bar.

Le attività svolte hanno riguardato:

- la realizzazione del rack;
- l'assemblaggio delle principali parti del circuito sperimentale;
- la realizzazione di una sezione di prova con un metodo innovativo di stampa 3D;
- l'individuazione dell'area in cui verrà installato l'impianto sperimentale;
- la redazione del progetto di massima per i lavori elettrici dell'area prescelta.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Introduzione alla realizzazione dei componenti principali dell'impianto sperimentale

Per la realizzazione dei componenti dell'impianto sperimentale si fa riferimento ai risultati della progettazione svolta nel corso delle attività dell'Accordo di Programma del 2015 e riportate nel rapporto [2].

Lo schema del circuito idraulico dell'impianto CO<sub>2</sub>ATTO è raffigurato nella figura 2.1.

L'apparato sperimentale CO<sub>2</sub>ATTO è costituito da due circuiti: il circuito primario, entro il quale fluisce la CO<sub>2</sub>, ed il Refrigeration Loop in cui fluisce una miscela di acqua e glicole.

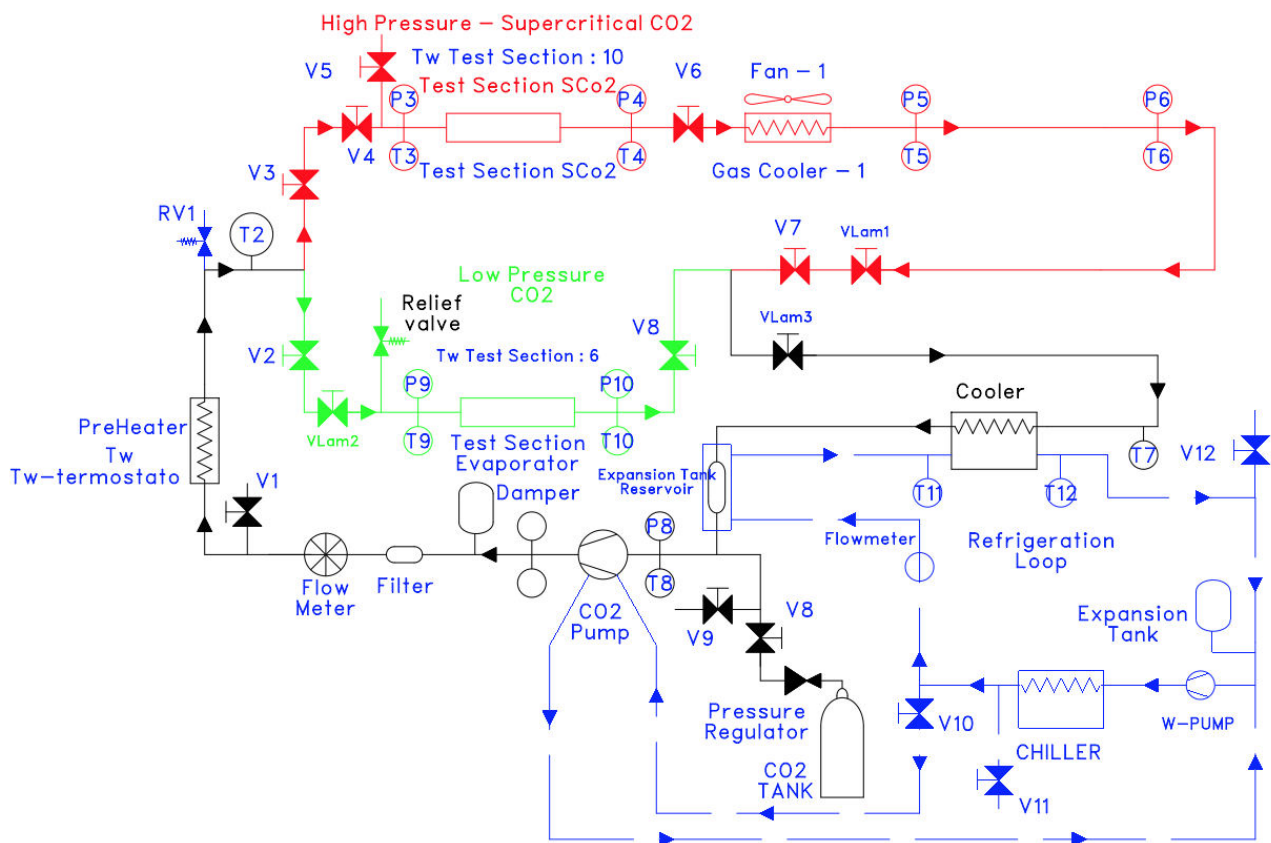
Il circuito primario è suddiviso a sua volta in due rami: uno ad alta pressione, denominato High Pressure – Supercritical CO<sub>2</sub> (in rosso nella Fig. 2.1), ed uno a bassa pressione denominato Low Pressure CO<sub>2</sub> (in verde

nella Fig. 2.1). Le prove con la CO<sub>2</sub> supercritica avverranno nel ramo ad alta pressione denominato High Pressure – Supercritical CO<sub>2</sub>. Il ramo a bassa pressione è stato inserito nel progetto poiché inizialmente, nel 2015 [2], le attività sperimentali prevedevano anche delle prove di scambio termico con il fluido in evaporazione. Con l’Accordo di Programma del 2016 le prove in evaporazione sono state cancellate e quindi queste non saranno eseguite. Nonostante tale cancellazione, l’impianto sperimentale sarà realizzato con un ramo a bassa pressione per eventuali prove che in un prossimo futuro dovessero essere necessarie per le attività sulle pompe di calore. Tale ramo a bassa pressione sarà presente in un formato semplificato e non utilizzato per completare il sistema di controllo e le prove di pressione dell’impianto stesso. Pertanto, di seguito verrà descritto il funzionamento e le caratteristiche del solo ramo ad alta pressione del circuito primario (indicato in rosso nella Fig. 2.1) in cui saranno effettuati i test di scambio termico con la CO<sub>2</sub> supercritica.

Il circuito primario ha lo scopo di fornire una portata di CO<sub>2</sub> alle condizioni di pressione, temperatura e portata, previste dalle prove sperimentali, all’ingresso della cosiddetta Sezione di Prova, Test Section nello schema di Fig. 2.1. La sezione di prova è il tubo in cui avviene lo scambio termico di cui si vuole misurare il coefficiente di scambio.

I componenti principali del circuito primario sperimentale sono (con riferimento alla denominazione dello schema riportato nella Fig. 2.1): CO<sub>2</sub> pump, flow meter, damper, pre-heater, test section, cooler, expansion tank-reservoir.

Il PreHeater e la sezione di prova sono i componenti più critici dal punto di vista strutturale in quanto soggetti a pressioni (fino a 130 bar) e temperature elevate (fino a 300 °C).



**Figura 2.1 Schema del circuito idraulico dell’impianto CO<sub>2</sub>ATTO**

Nel circuito primario il moto del fluido è garantito da una pompa a pistone di tipo oil free, cioè senza lubrificante a contatto con il fluido, che garantisce una pressione di mandata fino a 160 bar ed una portata massica nominale di 9 kg/h (fino a 11 kg/h in condizioni particolari).

Per le prove di scambio termico, il fluido, in condizioni supercritiche, entra nel preriscaldatore, dove viene riscaldato mediante una resistenza elettrica per effetto Joule; la regolazione della tensione di alimentazione consente di modificare la potenza termica fornita alla CO<sub>2</sub> in modo da gestire, mantenendo costanti le altre condizioni operative, la temperatura all'ingresso della sezione di prova.

Nella sezione di prova (Test Section S CO<sub>2</sub>) viene somministrato ulteriore calore alla CO<sub>2</sub> per effetto Joule, mediante il passaggio di corrente nel riscaldatore avvolto intorno al tubo di prova; la potenza termica trasferita al fluido può essere variata con continuità controllando la tensione di alimentazione tramite un alimentatore in corrente continua.

All'uscita della sezione di prova, il raffreddamento della CO<sub>2</sub> sarà garantito da un gas cooler (Gas Cooler 1) raffreddato ad aria e un cooler raffreddato a liquido (acqua e glicole) mediante il *Refrigeration Loop* (Fig. 2.1).

Il circuito ad acqua e glicole, denominato Refrigeration Loop, ha lo scopo di raffreddare ulteriormente il fluido per garantire le condizioni all'ingresso della pompa (CO<sub>2</sub> Pump) per un corretto funzionamento di quest'ultima. Per evitare il danneggiamento della pompa è necessario mantenere un sottoraffreddamento di almeno 10K all'ingresso della pompa stessa. In queste condizioni la CO<sub>2</sub> si trova allo stato liquido e ad una temperatura tale da non far avvenire il fenomeno della cavitazione nella pompa.

Nel Refrigeration Loop, la temperatura del fluido (acqua e glicole) è controllata da un chiller in modo automatico. Il chiller consente di ridurre la temperatura del fluido fino a -20°C.

La presenza di un damper riduce le pulsazioni trasmesse al fluido dalla pompa monocilindrica.

La Tabella 1 riporta gli intervalli di variazione previsti per i parametri indipendenti (portata, temperatura di parete, pressione, diametro e lunghezza riscaldata) per le prove sperimentali.

**Tabella 1. Elenco dei parametri indipendenti e dei relativi intervalli di variazione per i test con fluido supercritico**

Parametro	Intervallo
Portata di massa [kg/h]	0 - 11
T <sub>wall, supercrit</sub> [°C]	30 - 300
p [bar]	80 - 110
D [mm]	0.5 - 4.0
L <sub>ris</sub> /D [-]	20 - 50

Nei paragrafi seguenti verranno descritti i componenti dell'impianto sperimentale che sono stati realizzati nel laboratorio DTE-PCU-SPCT. I componenti utilizzati più importanti (pompa, chiller e diversi sensori di misura) sono stati acquistati nel corso del 2016 con le attività dell'Accordo di Programma con le attività previste per quel periodo [2].

## 2.2 Realizzazione del rack

La funzione del rack è quella di ospitare e sostenere il circuito idraulico dell'impianto sperimentale.

Lo schema del rack con le relative dimensioni è riportato nella Figura 2.2

Per la struttura del rack si sono utilizzati i profilati della Bosch Rexroth che garantiscono la resistenza meccanica necessaria e soprattutto la notevole flessibilità nella realizzazione di strutture modulari.



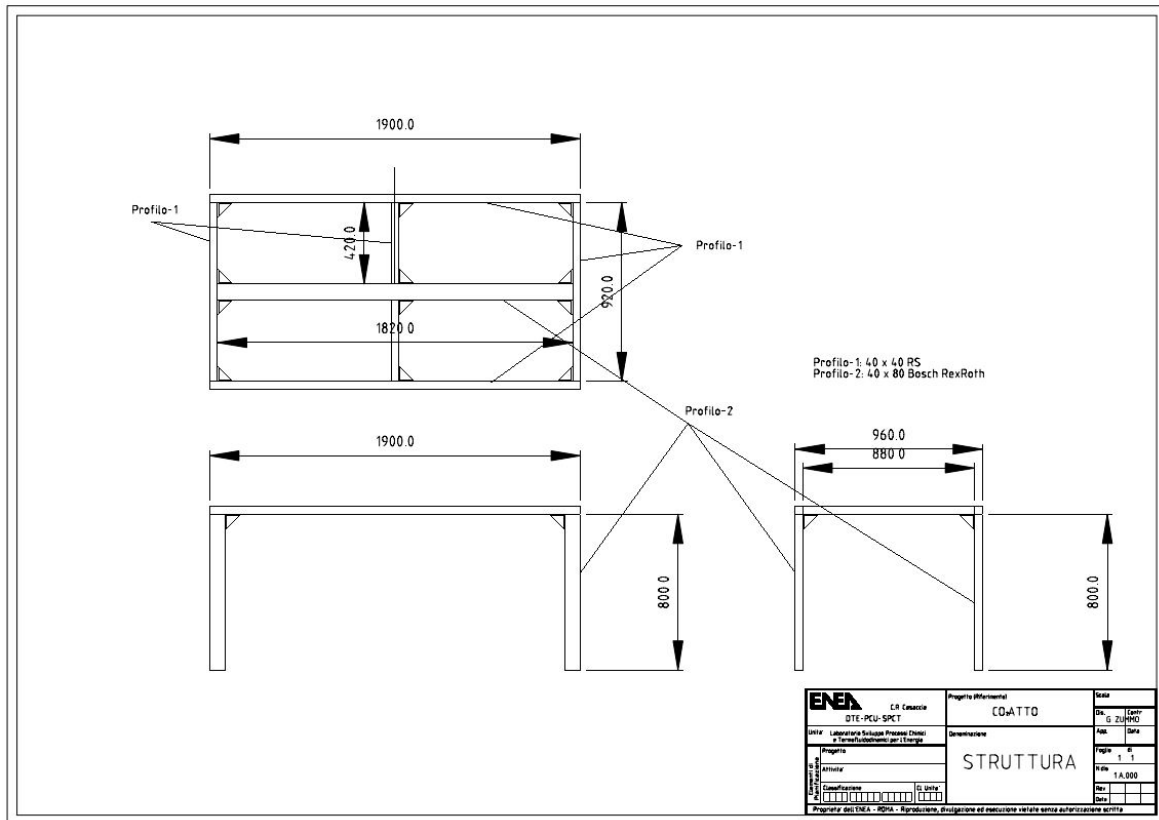


Figura 2.2 Disegno del rack dell'impianto CO<sub>2</sub>ATTO

Le sezioni dei profilati selezionati sono riportati nella Figura 2.3.

I profilati sono il 40mmx80mm ed il 40mmx40mm.

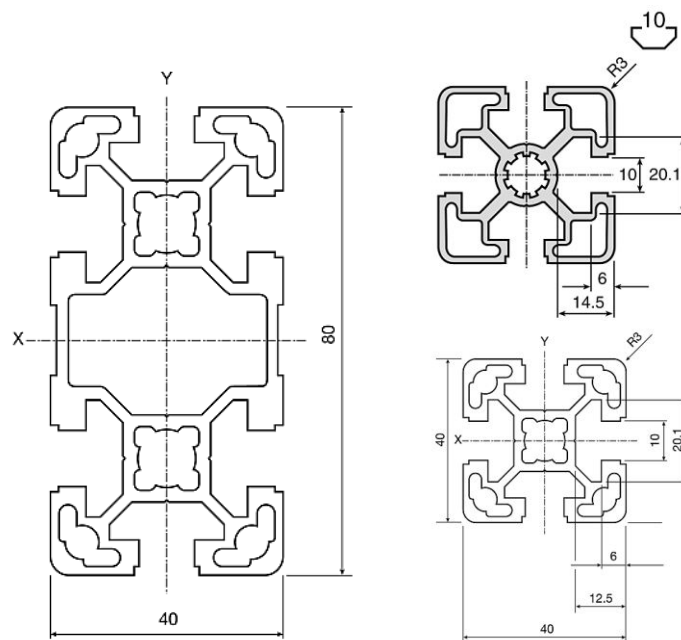


Figura 2.3 Sezioni trasversali dei profilati Bosch Rexroth adottati per la realizzazione del rack

La Figura 2.4 mostra la struttura realizzata nell'officina del Laboratorio.



Figura 2.4 Il rack assemblato

### 2.3 Gruppo pompa - cooler

Nella realizzazione dei componenti principali dell'impianto sperimentale è stato deciso di raggruppare in un unico blocco la CO<sub>2</sub> pump, l'expansion tank/reservoir e il cooler (con riferimento allo schema di Fig. 2.1).

La pompa di circolazione, CO<sub>2</sub> pump, è una pompa dosatrice a membrana per diossido di carbonio che consente una regolazione molto accurata della portata. Aspetto fondamentale per l'accuratezza e la ripetitività delle prove è che tale tipo di pompa garantisce l'assenza totale di lubrificante nel fluido termovettore. La pompa è il modello LDB1 M910S della LEWA con membrana PTFE, accoppiata ad un motore elettrico trifase di potenza pari a 0.75 kW, alimentato a 380 V (50 Hz). La fotografia della pompa è riportata nella Figura 2.5.

L'expansion tank/reservoir è un piccolo serbatoio da 0.5 litri che ha la funzione di garantire la minima quantità di CO<sub>2</sub> in fase liquida nel condotto di aspirazione della pompa e allo stesso tempo garantire la funzione di vaso di espansione al circuito della CO<sub>2</sub>. Quest'ultima caratteristica sarà garantita dal fatto che il serbatoio non verrà riempito completamente di liquido, ma sarà mantenuta una quantità di CO<sub>2</sub> in forma gassosa che garantirà la corretta variazione di volume per compensare le dilatazioni termiche.

Infine, il cooler è stato realizzato modificando uno scambiatore di calore presente nel laboratorio. Le modifiche hanno riguardato la sostituzione della serpentina interna con una nuova con un diametro adeguato ed una superficie di scambio sufficientemente grande per raffreddare il fluido con le portate previste. La nuova serpentina, realizzata in acciaio AISI 316L con un tubo da 3/8" di diametro, è stata provata a 160 bar. L'involucro esterno del cooler è stato tagliato per poter sostituire la serpentina e

successivamente è stato richiuso mediante saldatura. Anche per l'involucro esterno è stata effettuata la prova a pressione di 2 bar per verificare la tenuta idraulica.

Infine, è stato inserito il damper su una barra verticale. Lo schema del damper è riportato nella Fig. 2.6. Questo componente è necessario per smorzare le pulsazioni indotte dalla CO<sub>2</sub> pump.



Figura 2.5 Fotografia della pompa a membrana della LEWA.

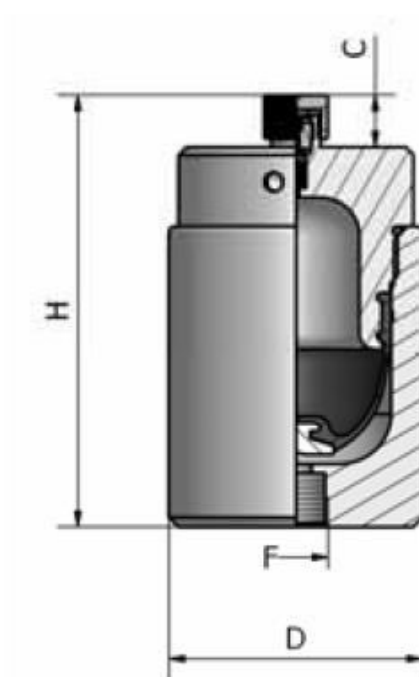


Figura 2.6. Schema dello smorzatore di pulsazioni (Damper)

La Fig. 2.7 mostra un'immagine del blocco pompa-cooler montato su una struttura realizzata con i profilati della Bosch. Il blocco così realizzato consente un facile posizionamento al di sotto del rack, mantenendo tutti i suoi componenti solidali tra loro. Nell'immagine della Fig. 2.7 è possibile identificare la CO2 pump, il tank, il cooler e di spalle, il damper.

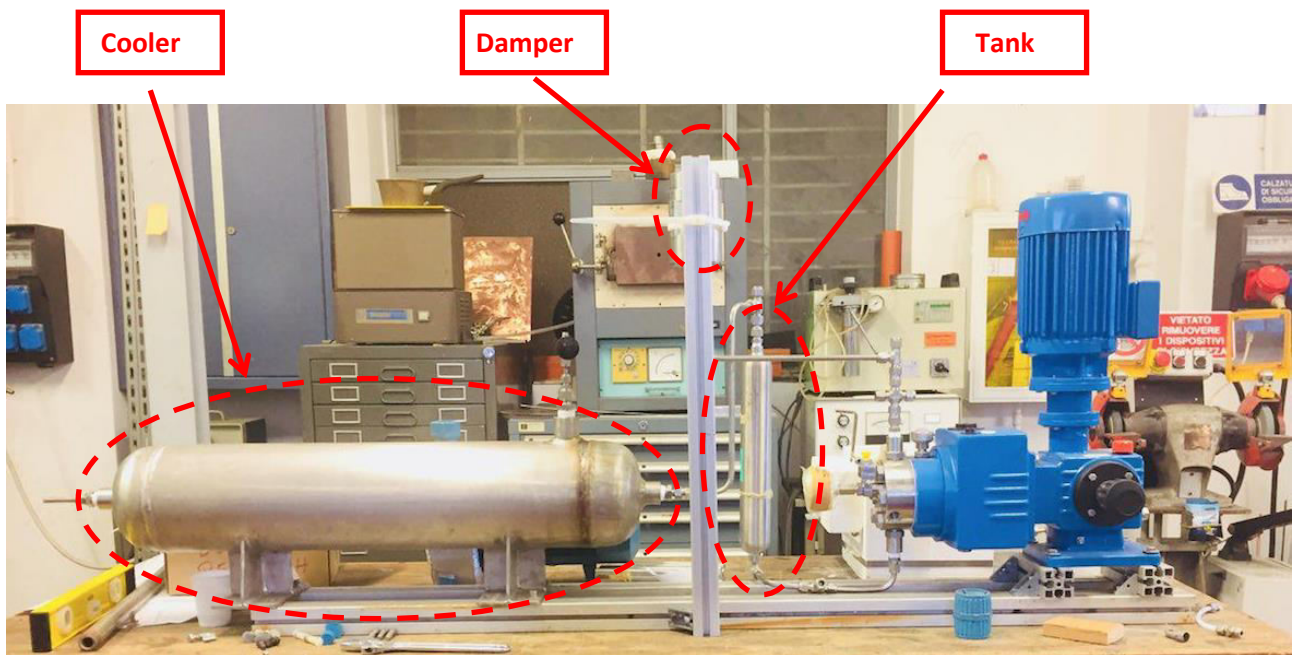
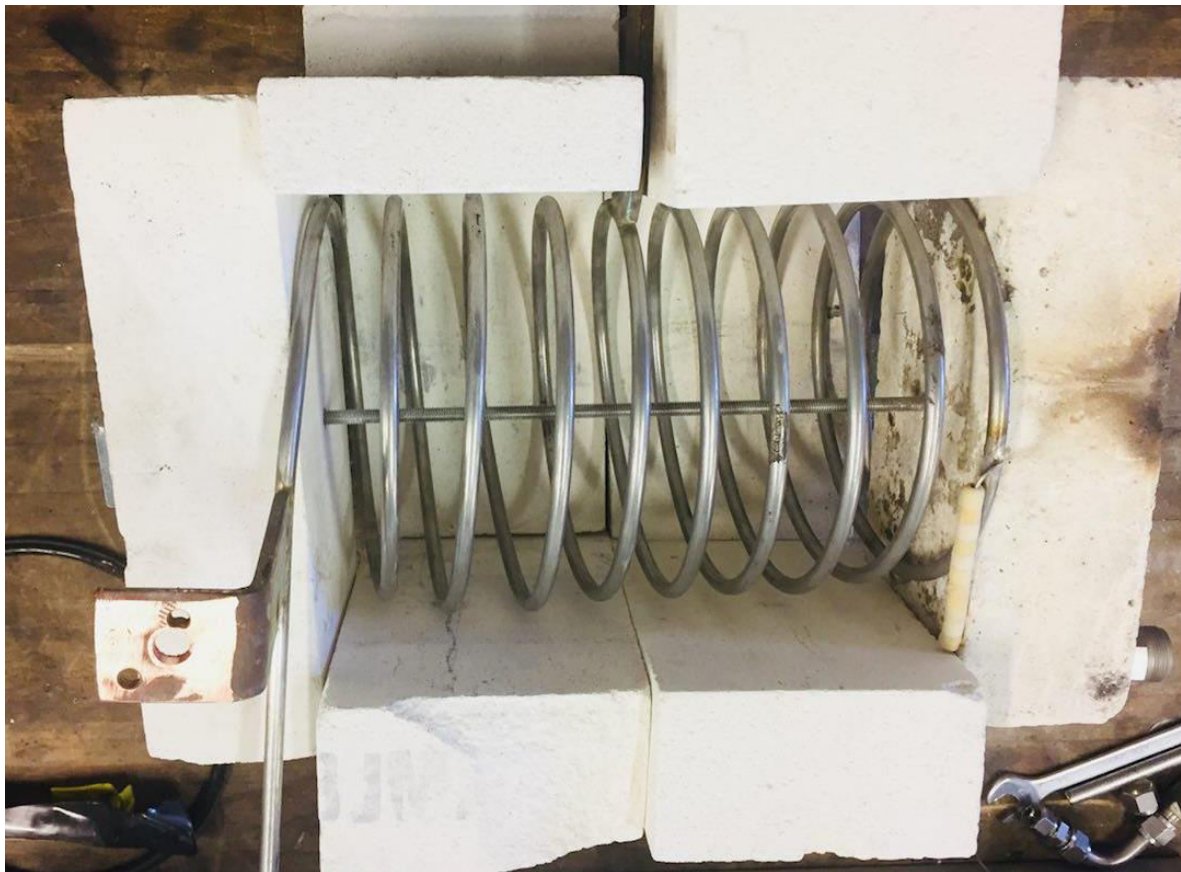


Figura 2.7 Fotografia del gruppo pompa-cooler.

## 2.4 Pre-heater

Per il pre-heater (preriscaldatore) è stato deciso di utilizzare una serpentina in acciaio AISI304 con un diametro esterno da 1/4". Tale serpentina verrà riscaldata per effetto Joule, sfruttando la resistenza elettrica della serpentina stessa, tramite un collegamento diretto ad un alimentatore in corrente continua da 500 A e 60 V. La serpentina è stata realizzata con 10 spire con un diametro esterno di 150 mm. La lunghezza della serpentina è pari a 4.7 m. Con questa geometria la resistenza elettrica totale della serpentina è pari a 0.48 Ohm. Con tale resistenza si possono valutare le caratteristiche dell'alimentazione in corrente continua per fornire al fluido nel preriscaldatore 2000W: 31 Volt e 65 Ampere.

La Fig. 2.8 mostra una fotografia del preriscaldatore realizzato nell'officina del laboratorio e costituito dalla serpentina di acciaio inserita in un involucro di mattoni refrattari. L'involucro consente di isolare la serpentina in acciaio dal punto di vista elettrico e termico.



**Figura 2.8** Fotografia del preriscaldatore (pre-heater).

## 2.5 Sezione di Prova

La sezione di prova dell'impianto sperimentale è il componente di più complessa realizzazione a causa dei tanti requisiti che deve rispettare. Come anticipato nell'introduzione, la sezione di prova deve avere una geometria cilindrica con uno spessore costante per garantire un flusso termico uniforme. All'interno del condotto cilindrico fluisce la CO<sub>2</sub> ad una pressione fino a 130 bar. Tale sezione riscalda il fluido e ne viene misurata la temperatura di parete in diverse sezioni. Infine, dalle misure della temperatura di parete è possibile risalire al coefficiente di scambio termico tra il fluido e la parete stessa.

La figura 2.9 mostra il disegno della sezione trasversale della sezione di prova. Questa è costituita da un condotto cilindrico con diametro interno pari a 4 mm, diametro esterno pari a 12 mm e lunghezza pari a 166.94 mm. Nel mantello cilindrico vi sono le sedi per le termocoppie da 0.5 mm, mentre all'esterno è stata realizzata una sorta di filettatura per ospitare un riscaldatore a filo avvolto nella filettatura stessa.

Per la realizzazione della sezione di prova in un unico pezzo non è stato possibile ricorrere ai metodi di lavorazione tradizionali. Pertanto, per la sua realizzazione è stata adottata la soluzione innovativa di stampa 3d.

Per questa lavorazione particolare è stata scelta la società ProtoLabs che propone una stampante 3d di ultima generazione. La tecnologia proposta di stampa 3D è la Sinterizzazione Laser Diretta dei Metalli (DMLS) con l'utilizzo di una lega di alluminio (AlSi10Mg). Questa tecnica consente di realizzare dei componenti con geometrie complesse e condotti di piccolo diametro in un unico pezzo che sono impossibili da ottenere con le tecnologie classiche.

Durante questo anno si è studiata la fattibilità di tale soluzione con una sezione di prova con diametro interno pari a 4 mm e sono stati svolti dei test per verificare le prestazioni delle misure sperimentali.

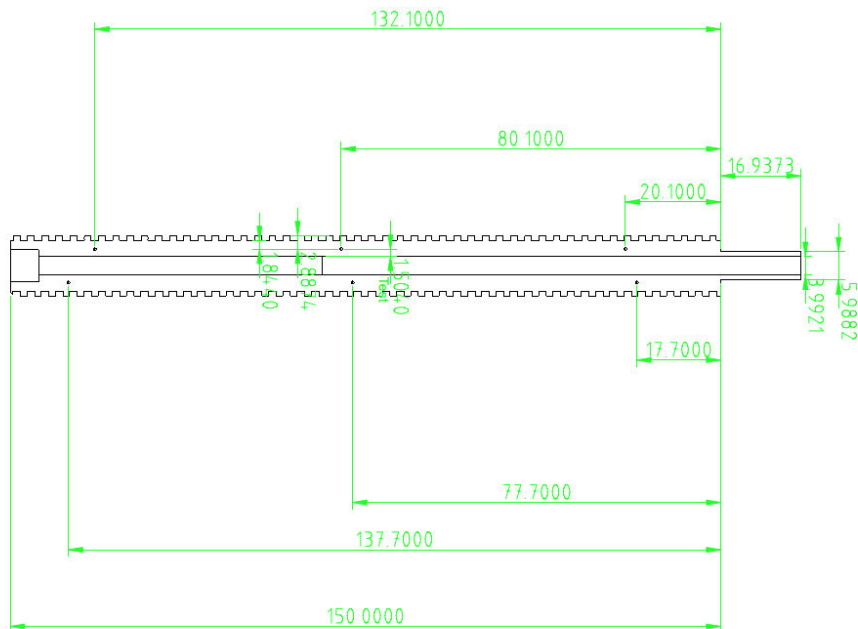


Figura 2.9. Sezione trasversale della sezione di prova.

I test di validazione della sezione di prova sono stati svolti su un impianto sperimentale già esistente, seppur con un diverso fluido di lavoro e pressioni decisamente più basse.

La figura 2.10 mostra la sezione di prova non strumentata realizzata con la tecnica della stampa 3d. La Figura 2.11 mostra la sezione di prova con il riscaldatore a filo avvolto lungo la filettatura esterna. Nell'immagine si possono notare chiaramente i fori per le termocoppie da 0.5 mm da inserire nel mantello cilindrico. Con la tecnica utilizzata i fori delle termocoppie sono stati "stampati" durante la realizzazione della sezione di prova.

La sezione di prova è stata installata in un impianto sperimentale, diverso dal CO<sub>2</sub>ATTO, per alcuni test funzionali con perfluoroesano. I test hanno avuto esito positivo ed hanno consentito di verificare il corretto funzionamento del riscaldatore e delle misure di temperatura con le termocoppie. La figura 2.12 mostra la sezione di prova inserita nel circuito di prova con tutti i sensori di temperatura.

Infine, è stata fatta un'analisi tramite microscopio elettronico della superficie interna della sezione di prova. Per la misura della rugosità è necessario effettuare un trattamento di alluminizzazione della superficie per renderla riflettente al laser dello strumento. Il provino per il test era troppo piccolo, per cui sarà necessario realizzarne uno più grande per completare il test.

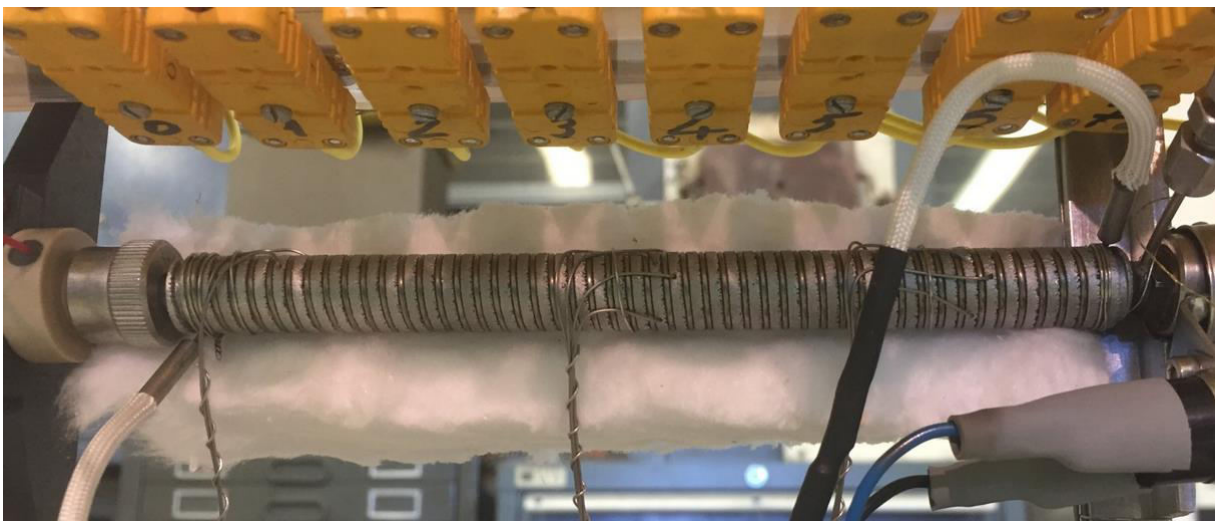
La foto della Figura 2.13 mostra l'ingrandimento della superficie interna del condotto di scambio termico ottenuto con il microscopio elettronico.



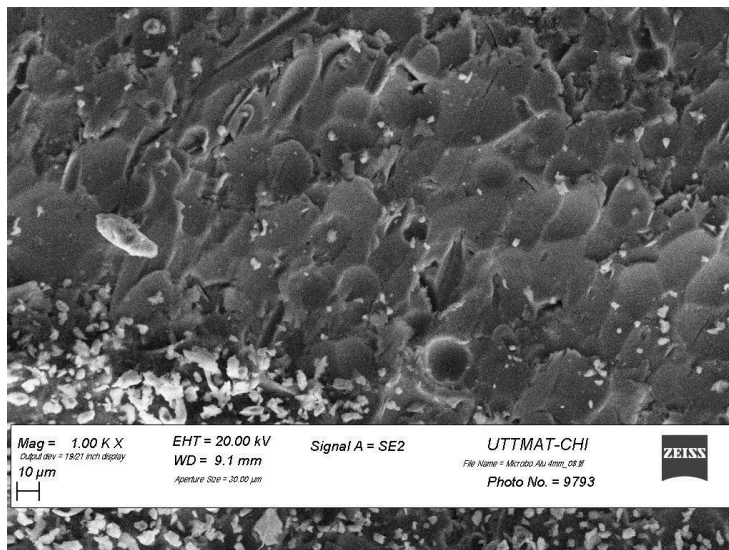
**Figura 2.10. Fotografia della sezione di prova realizzata con stampante 3D**



**Figura 2.11. Immagine della sezione di prova con il riscaldatore a filo avvolto lungo la filettatura esterna.**



**Figura 2.12. Immagine della sezione di prova con il riscaldatore e le termocoppie inserita in un circuito per alcuni test di funzionamento con perfluoroetano.**



**Figura 2.13** Immagine ottenuta con un microscopio elettronico della superficie interna della sezione di prova. L'ingrandimento è pari a 1000.

## 2.6 Progetto elettrico di massima per i lavori elettrici del sito ove verrà installato l'impianto sperimentale

E' stato deciso di collocare l'impianto sperimentale CO<sub>2</sub>ATTO nell'area recintata esterna all'ed. F-20 sotto la tettoia preesistente. Questa sistemazione è stata scelta per operare in piena sicurezza con un impianto sperimentale in cui circola un fluido ad alta temperatura e alta pressione. Come è stato definito nell'introduzione, il fluido raggiungerà temperature dell'ordine dei 300 °C e pressioni fino a 130 bar. Infine tale collocazione faciliterà enormemente il raffreddamento del fluido mediante il gas cooler – 1 (un aeroterma) mantenendo all'esterno dell'edificio tutte le fonti di calore ad alta temperatura.

Durante questo anno di attività si è proceduto ad una sistemazione dell'area sotto la tettoia, sgombrando i vecchi materiali e sistemando il prato ed è stato redatto un progetto di massima per definire i lavori da effettuare.

Per rendere tale area idonea ad ospitare l'impianto sperimentale è necessario effettuare i seguenti lavori:

1. bonificare i cavidotti preesistenti rimuovendo i vecchi cavi elettrici;
2. installare un quadro elettrico ed i relativi cavi, utilizzando per questi ultimi i cavidotti esistenti;
3. collegare il quadro elettrico al quadro elettrico di bassa tensione della hall dell'edificio F-20;
4. installare un cavo ethernet per la trasmissione dei dati del sistema di acquisizione e controllo;
5. installare un impianto di illuminazione.



Il progetto di massima completo si trova nel documento allegato intitolato "IMPIANTO ELETTRICO EDIFICIO F-20 IMPIANTO CO<sub>2</sub>ATTO" [4].

Si riporta di seguito un estratto del rapporto per la realizzazione dei lavori.

La presente specifica tecnica definisce i requisiti fondamentali di progetto e di costruzione dell'impianto elettrico che dovrà essere realizzato in un'area esterna all'edificio F-20 del C.R. Casaccia, con particolare riferimento a: fornitura e posa in opera di un quadro elettrico, fornitura e posa in opera di una linea di trasmissione dati, fornitura e posa in opera del cavo di alimentazione elettrica dell'impianto "CO<sub>2</sub>ATTO" proveniente dal quadro generale di bassa tensione della hall dell'Ed.F-20, fornitura e posa in opera di un impianto di illuminazione sotto tettoia dell'area esterna.

Inoltre si dovrà bonificare un cavidotto che collega l'area esterna all'Ed.F-20 e delle tubature poste a parete lato ingresso dello stesso Ed.F-20 che arrivano fino all'esterno della hall, per la posa in opera del cavo di alimentazione dell'impianto.

Si dovrà inoltre realizzare la continuità meccanica tra cavidotto e tubazione esterna e tra questa e la passerella posta nella hall del F-20 con opportune passerelle zincate con coperchio.

La Ditta dovrà redigere, sulla base delle specifiche tecniche fornite in questo documento e dei disegni preliminari allegati, il progetto definitivo del quadro elettrico da installare e dei lavori da eseguire, che sarà sottoposto ad approvazione da parte dell'ENEA prima dell'inizio lavori da parte della DITTA



**Figura 2.14 - Vista esterna dell'Edificio F-20 e dei cavidotti da bonificare**

Sotto il manto stradale di colore più chiaro è posto il cavidotto, che parte dal tombino (pozzetto nella Fig. 2.14) visibile in foto posto sul marciapiedi a ridosso della parete dell'edificio e arriva ad un tombino posto all'interno del cancello visibile sulla destra a circa 2 metri dallo stesso



Figura 2.15 - Tettoia esterna dove sarà installato l'impianto sperimentale CO<sub>2</sub>ATTO

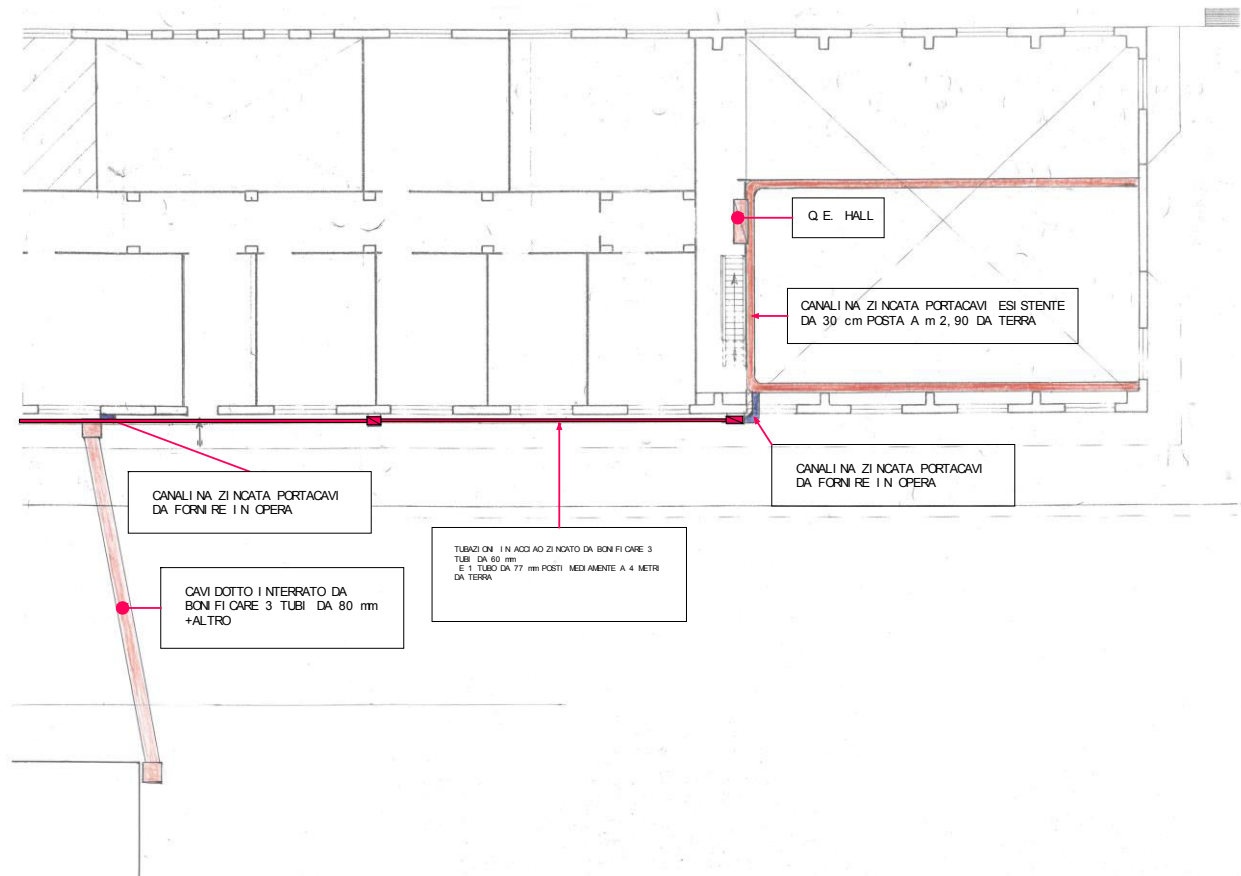
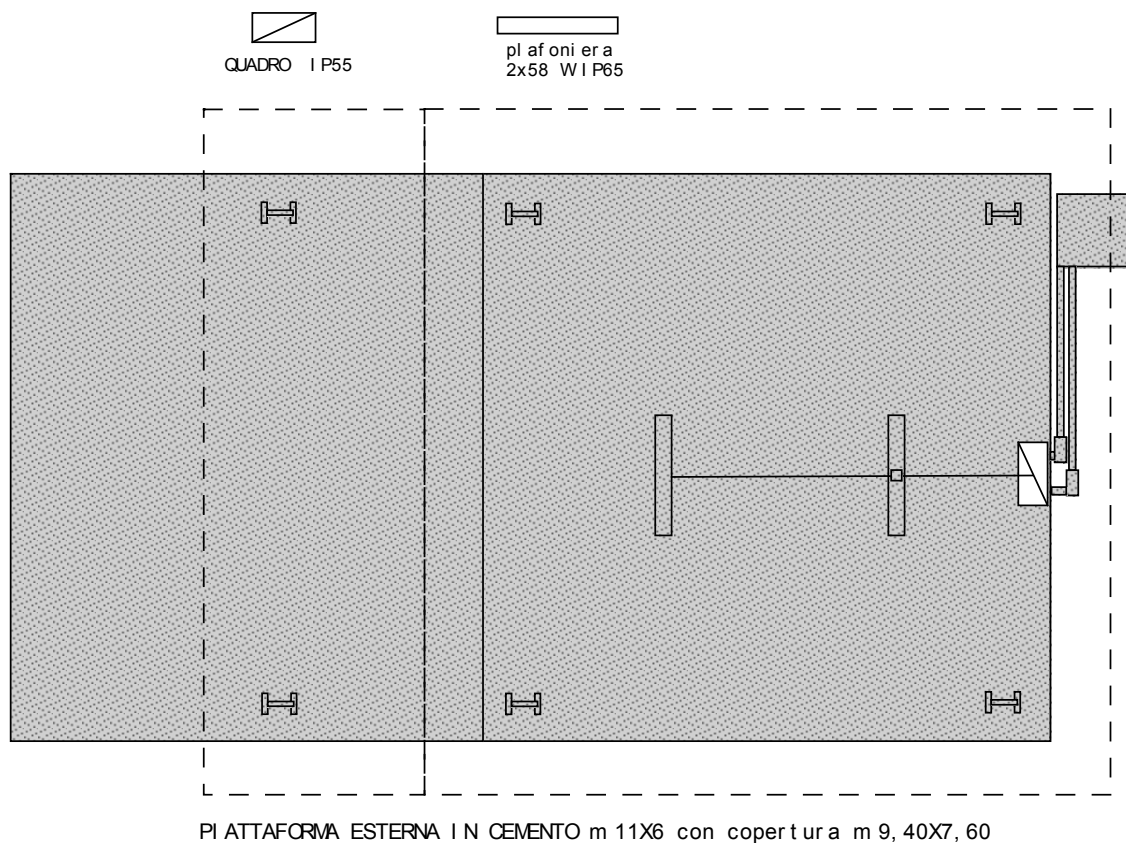


Figura 2.16 – Schema del percorso dei cavi elettrici



**Figura 2.17 – Pianta della tettoia esterna dove dovrà essere installato l’impianto sperimentale CO<sub>2</sub>ATTO.**

### 3 Conclusioni

L’attività dell’annualità ha riguardato la progettazione e l’inizio della realizzazione dell’impianto sperimentale, denominato CO<sub>2</sub>ATTO (CO<sub>2</sub> Apparatus for Thermal Test Optimization) che ha come finalità quella di effettuare misure dei coefficienti di scambio termico della CO<sub>2</sub> in condizioni supercritiche e nelle regioni limitrofe al punto critico. La geometria dei condotti in cui misurare lo scambio termico sarà di tipo tubolare con diametri idraulici tipici delle geometrie di una palettatura di turbina. I diametri previsti sono nell’intervallo 0.5 mm e 4.0 mm. Il campo di temperatura previsto per le prove sperimentali va da 30 a 300 °C, con portata massica fino a 11 kg/h e pressioni fino a 130 bar.

Nella annualità, alla progettazione è seguita la realizzazione del rack sul quale verrà installato il circuito sperimentale e sono state realizzate le principali parti del circuito (blocco CO<sub>2</sub> pump – Cooler, cooler e pre-heater). E’ stata inoltre realizzata una prima sezione di prova, mediante una tecnica innovativa di stampa 3D, ed eseguiti i test di verifica, su un altro il circuito sperimentale, del corretto funzionamento del riscaldatore e delle misure di temperatura con le termocoppie. Il circuito sperimentale vedrà come collocazione definitiva un sito esterno ai laboratori e ciò ha comportato la definizione e redazione del progetto di massima per eseguire, nella successiva annualità, i lavori elettrici necessari per l’area prescelta. Nel corso della prossima annualità sarà realizzata e messa a punto la facility CO<sub>2</sub>Atto, saranno progettati e realizzati i provini e quindi saranno pianificati e realizzati i test sperimentali. L’obiettivo del progetto è quello di effettuare prove sperimentali di trasmissione del calore con la CO<sub>2</sub> supercritica per lo studio dei coefficienti di scambio termico; i risultati sperimentali saranno confrontati con i modelli disponibili in letteratura e forniranno la conoscenza di base per definire metodi e modelli per la progettazione dei sistemi di controllo termico di componenti sottoposti ad elevato stress termico.

## 4 Riferimenti bibliografici

I riferimenti bibliografici devono essere richiamati nel testo con numeri progressivi tra parentesi quadre e riportati a fine testo con il seguente formato:

1. M. Pieve, L. Saraceno, R. Trinchieri, G. Zummo, E. Giacomazzi and G. Messina, “*Analysis of CO<sub>2</sub> transcritical power cycles for low temperature heat sources*”, 32nd UIT HEAT TRANSFER CONFERENCE Pisa, June 23-25th, 2014
2. G. Zummo, G. Boccardi, A. Franchi, A. Lattanzi, M. Morlacca, M. Pieve, L. Saraceno, A. Scotini, L. Simonetti, R. Trinchieri, “*Progetto del circuito per le prove sperimentali su mini-micro canali con CO<sub>2</sub>*”, Report Rds/PAR2015/173
3. F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, “*Heat transfer in automobile radiators of the tubular type*”, University of California Publications in Engineering, 2, 443-461, 1930.
4. ENEA, A. Lattanzi, G. Zummo, “*SPECIFICA TECNICA IMPIANTO ELETTRICO + QUADRO ELETTRICO EDIFICIO F-20 IMPIANTO CO<sub>2</sub>ATTO*”, 2017

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

simboli	Pedici
$c_p$ Calore specifico a pressione costante [J/kg K]	D relativo al diametro
D Diametro [m]	
$\mu$ Viscosità dinamica [Pa s]	
K Conducibilità termica [W/m K]	
$\rho$ densità [kg/m <sup>3</sup> ]	
h coeff. scambio termico [W/m <sup>2</sup> K]	
v Velocità [m/s]	