



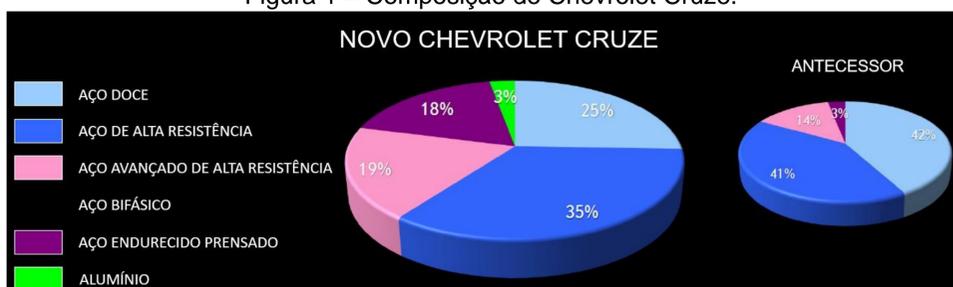
## “Avaliação das propriedades mecânicas de um aço Dual Phase”

### Introdução

O projeto tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas e microestrutura de um aço Dual Phase produzido em laboratório, a partir de um aço 8620, verificando seu desempenho para uma possível aplicação estrutural na indústria automobilística, em que se espera principalmente boas ductilidade e resistência mecânica.

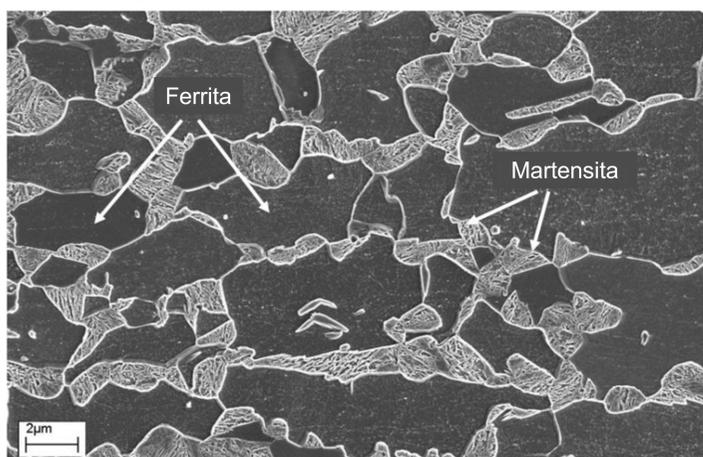
A substituição dos aços comuns por aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) proporciona um ótimo desempenho para peças com fins estruturais, reduzindo o peso do automóvel, melhorando o rendimento e o impacto ambiental. A Figura 1 mostra a evolução da composição de aço no automóvel, que resultou numa redução de 52 kg no peso final.

Figura 1 – Composição do Chevrolet Cruze.



Um aço dual phase (bifásico) é composto por duas fases. No aço em estudo as fases são ferrita e martensita, em que a matriz é ferrítica com ilhas de martensita ao seu redor. A Figura 2 ilustra a microestrutura típica do aço.

Figura 2 – Microestrutura do aço dual phase.



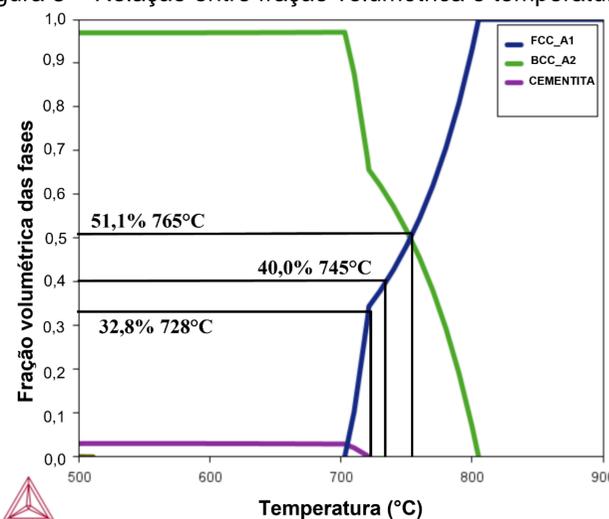
### Metodologia

Para a produção deste aço em laboratório foi realizada a têmpera, ou seja, o aço foi aquecido a uma temperatura dentro da zona crítica (entre  $A_1$  e  $A_3$ ) e, em seguida, resfriado em óleo a uma taxa superior à crítica definida em diagramas de transformação sob resfriamento contínuo (TRC) do SteCal<sup>®</sup>. Esses diagramas, além de fornecerem dados sobre taxa de resfriamento, são apresentadas as temperaturas de transformação martensítica ( $M_s$  e  $M_f$ ) da estrutura de acordo com a composição química, que são importantes para o delineamento do tratamento térmico e influenciam diretamente propriedades as do aço.

A fim de avaliar as diferenças entre propriedades mecânicas e microestruturas, foram objetivadas 3 diferentes frações volumétricas de martensita, 32,8%, 40,0% e 51,1%, que correspondem respectivamente às

temperaturas de austenitização parcial de 728°C, 745°C e 765°C. Esses valores foram obtidos através de simulações de ciclo térmico do ThermoCalc<sup>®</sup> representadas no diagrama da Figura 3.

Figura 3 – Relação entre fração volumétrica e temperatura.

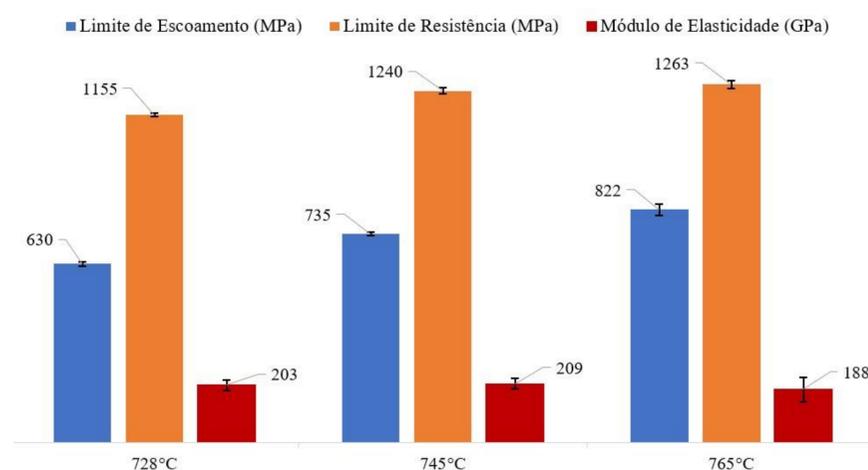


Após a austenitização parcial e têmpera nas três temperaturas determinadas foram realizados ensaios de tração, Ferritoscopia, Dureza, Difração de Raios-X e Metalografia para quantificar as propriedades mecânicas e microestruturas do aço.

### Resultados e Discussão

Com os dados representados na Figura 4, nota-se que o tanto o limite de escoamento quanto o limite de resistência aumentam conforme maior temperatura de austenitização parcial, o que se deve ao maior teor de martensita na estrutura, que é uma fase de maior resistência. Já o módulo de elasticidade, que está numa faixa de 188 e 209 GPa, pode sofrer influência da austenita retida.

Figura 4 – Propriedades mecânicas x temperatura.

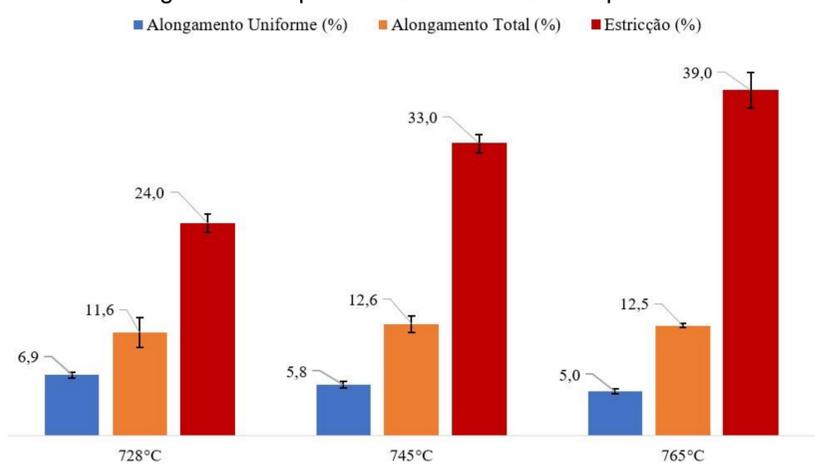


Para confirmar a influência da austenita retida, através da lei das misturas, foram calculados os limites inferior e superior do módulo de elasticidade, considerando os valores de 190 GPa para austenita e 207 GPa para ferrita/martensita. Foi obtido  $E_{superior}=205,5$  GPa e  $E_{inferior}=205,3$  GPa, indicando que a austenita retida não seria capaz de impor tamanha influência na medição, descartando-a como justificativa da variação. Assim, uma possível justificativa para os Módulos de Elasticidade encontrados é um desvio no método de determinação escolhido.



O comportamento das propriedades de alongamento e estrição encontram-se na Figura 5. O alongamento uniforme diminui na presença de maior fração volumétrica de martensita enquanto o alongamento total se mantém praticamente constante, os quais sofrem influência da homogeneidade de distribuição da ferrita nas amostras. O aumento da estrição é justificado pelo maior teor de austenita retida na estrutura e refino do tamanho de grão da ferrita.

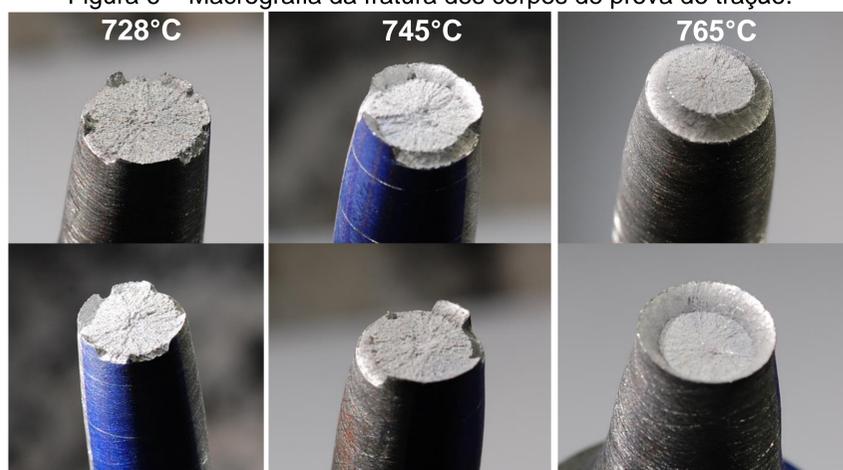
Figura 5 – Propriedades mecânicas x temperatura.



O aspecto da fratura dos corpos de prova de tração mostra a relação com as propriedades mecânicas explicadas anteriormente. Todas apresentaram fraturas dúcteis com aspecto fibroso e irregular na superfície interna, indicando que houve deformação plástica.

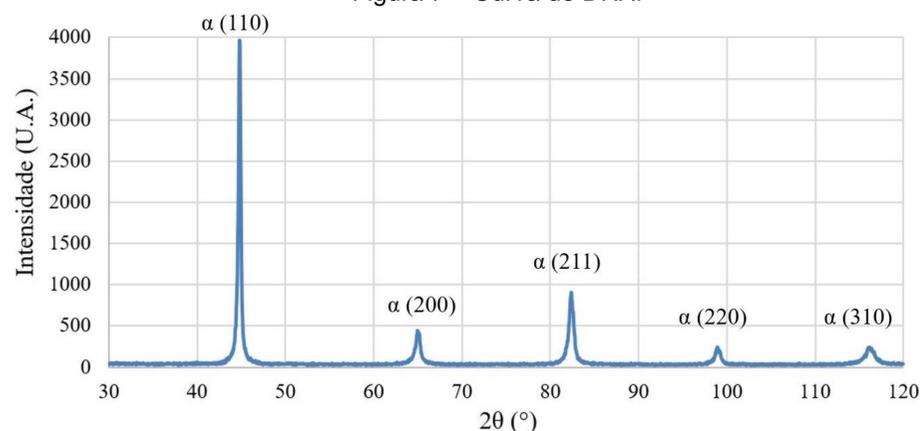
Os corpos de prova a 728°C e 745°C apresentam fraturas muito semelhantes, com um perfil estrela e pontiagudo, quando comparado às amostras de 765°C. Já os corpos de prova a 765°C apresentaram uma fratura estilo taça cone bastante didática com a superfície interna mais regular, podendo ser justificada pela distribuição mais homogênea da ferrita, maior porcentagem de martensita na estrutura e maior estrição dos corpos de prova, indicando maior ductilidade e maior resistência aos esforços aplicados.

Figura 6 – Macrografia da fratura dos corpos de prova de tração.



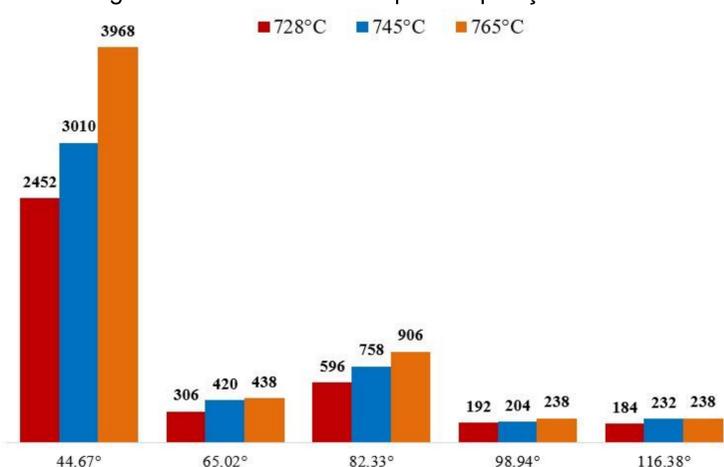
A técnica de Difração de Raios-X permite caracterizar as fases presentes na amostra, e após o ensaio realizado foram construídos gráficos para cada uma das amostras, contendo os picos e planos cristalográficos das fases. As amostras das três diferentes temperaturas de austenitização parcial apresentaram os mesmos picos e planos cristalográficos, indicando apenas a presença de picos de ferrita, que englobam a fase martensita também. A Figura 7 representa esse comportamento similar para as amostras.

Figura 7 – Curva de DRX.



A diferença observada entre as curvas para as diferentes temperaturas foi com relação à intensidade dos picos, que aumentam com a maior temperatura de tratamento térmico. A intensidade está relacionada à densidade planar atômica do plano em questão, conforme a temperatura aumenta, os parâmetros de rede da martensita e da ferrita ficam mais próximos devido à menor distorção da estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), ficando essa mais similar à cúbica de corpo centrado (CCC), dada a diluição de C na austenita que gera a martensita.

Figura 8 – Intensidade dos picos x posições.



A Ferritoscopia, através do magnetismo das fases, mede a quantidade de fase magnética presente na amostra e, conseqüentemente, calcula-se a fase paramagnética (austenita retida). Foi obtido 1,7%, 5,2% e 8,8% de austenita retida em 728°C, 745°C e 765°C, respectivamente. Este comportamento se deve principalmente aos teores de carbono presentes na composição da austenita em cada uma das temperaturas, uma vez que esse elemento é um dos principais fatores que afetam a  $M_s$  e  $M_f$ . Essa austenita retida que não foi identificada no DRX provavelmente encontra-se finamente distribuída entre as ripas de martensita.

Com relação à dureza foi observado 320, 357, 376 HV em 728°C, 745°C e 765°C, respectivamente. Esse aumento na dureza conforme maior temperatura ocorre devido ao maior teor de martensita na estrutura (32,8%, 40,0% e 51,1%), uma vez que esta fase é mais dura que as demais.

Temperatura	Austenita retida (%)	Dureza (HV)
728°C	1,7	320
745°C	5,2	357
765°C	8,8	376



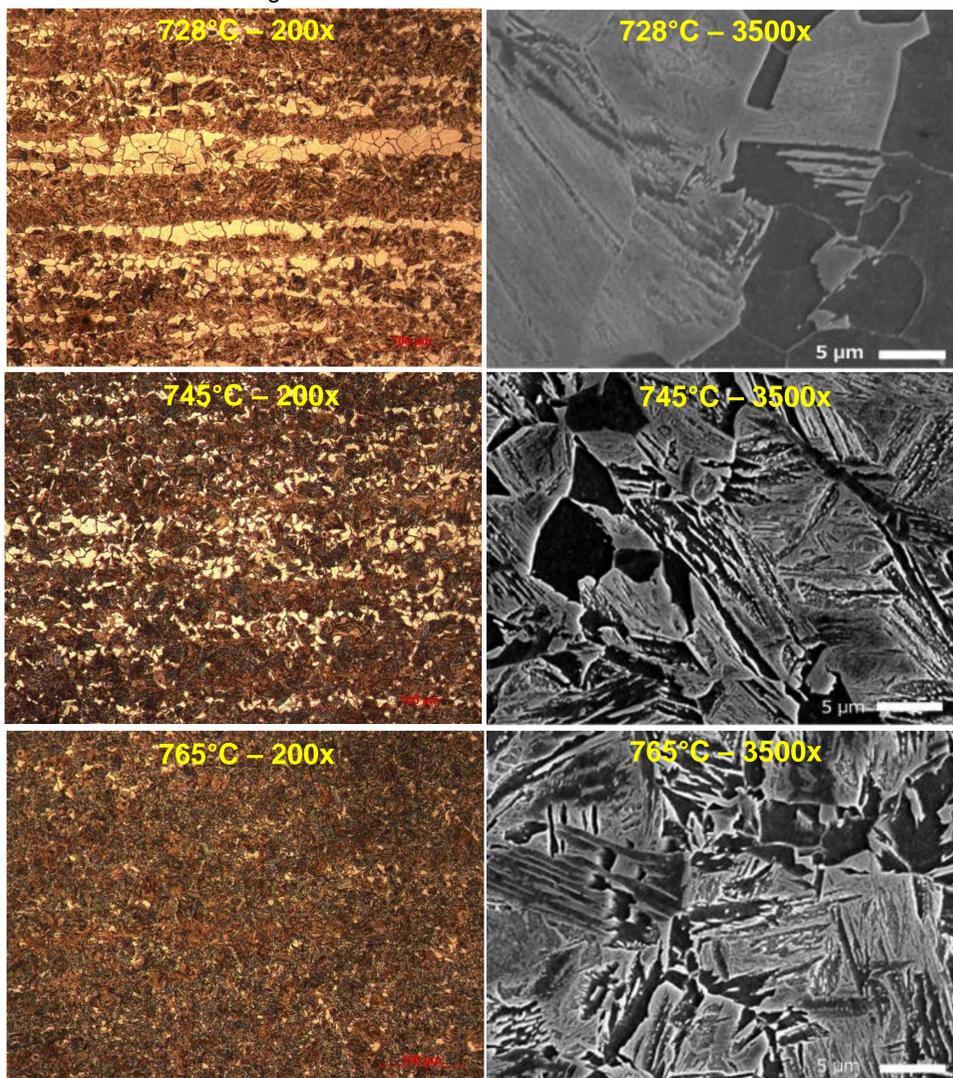
As microestruturas de microscopia óptica (MO) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresentam resultados similares e complementares de aspectos importantes para o desempenho do aço. A Figura 9 ilustra a microestrutura das amostras de 728°C, 745°C e 765°C em 200x e 3500x.

Primeiramente observa-se somente a presença de ferrita e martensita na estrutura (já esperado e previsto na estrutura), além de ser visualmente perceptível que, conforme a temperatura aumenta, maior a presença de martensita e menor a de ferrita. Na amostra de 728°C fica bem clara a distinção entre as fases, uma vez que há a presença de bandas (“linhas” horizontais com regiões claras) devido a uma homogeneização incompleta da estrutura, apresentando segregação dos elementos de liga presentes.

Também nota-se uma diminuição do tamanho de grão da ferrita, com isso, a resistência mecânica aumenta, pelo maior refino do grão, juntamente com a maior porcentagem de martensita na estrutura, o que é comprovado pelas propriedades mecânicas da Figura 4.

Nas micrografias com 3500x observa-se com maiores detalhes a morfologia da martensita, que são diferentes devido as composições químicas da austenita. A austenita retida, que não foi identificada no DRX, apresentou maiores teores em 765°C e encontra-se entre as ripas de martensita, o que justifica a maior estrição no corpo de prova e a fratura taça-cone perfeita, juntamente com a distribuição mais homogênea da ferrita na estrutura.

Figura 9 – Microestruturas em MO e MEV.

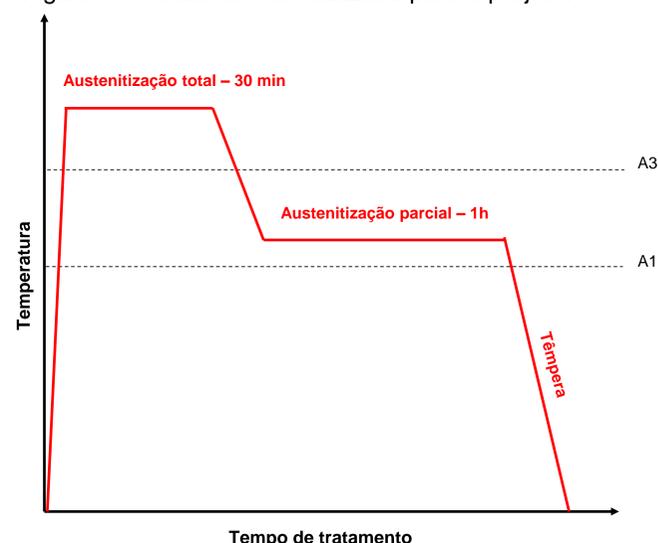


Através do ImageJ® foram quantificadas as frações volumétricas de cada uma das fases. A Tabela 1, que contém valores para a martensita, mostra que embora as proporções de martensita na estrutura seguem um padrão de aumento conforme maior temperatura, os valores obtidos destoam do previsto inicialmente pelo ThermoCalc®. Isso sugere que o tempo de 1h de patamar isotérmico (austenitização parcial) não foi suficiente para que a austenita formasse a ferrita de equilíbrio de forma completa esperada pelo equilíbrio termodinâmico. A Figura 10 ilustra o ciclo térmico realizado.

Tabela 1 – Comparação entre ImageJ® e ThermoCalc®.

Temperaturas	ImageJ®	ThermoCalc®
728°C	64,9%	32,8%
745°C	85,1%	40,0%
765°C	92,3%	51,1%

Figura 10 – Ciclo térmico utilizado para o projeto.



## Conclusão

A análise realizada confirma que, através do ciclo térmico proposto, a microestrutura obtida foi de um aço dual phase, em que a matriz é ferrítica com ilhas de martensita ao seu redor. Além disso, com relação às propriedades mecânicas foi obtido um bom desempenho. O limite de resistência é superior a 1100 MPa e o alongamento é superior a 10%, além de as demais propriedades mecânicas apresentarem valores que contribuem para aplicações estruturais na indústria automotiva.

Comparado a aços convencionais, o dual phase se mostra superior. A partir das ferramentas computacionais de simulação e de design foi elaborado o tratamento térmico para atingir a microestrutura desejada. Esta apenas não foi totalmente atingida, pois o ciclo térmico escolhido não teve tempo o suficiente para as trocas térmicas necessárias para o tamanho da peça. Assim, a partir de novas simulações que considerem as trocas térmicas de acordo com as dimensões da peça, as frações volumétricas reais das fases estarão mais próximas às previstas em teoria.

Dessa forma, a combinação do previsto pelas ferramentas computacionais e dos experimentos práticos realizados, verifica-se que a performance do aço é aumentada, confirmando a viabilização de aplicação no mercado automotivo, em que são necessárias boas ductilidade e resistência mecânica.